

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: AMBIENTE CONSTRUÍDO E GESTÃO

MONALISA COELHO MARTINS

**O TRATAMENTO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL NAS NORMAS  
TECNICAS BRASILEIRAS E SEU IMPACTO NO CONSUMO ENERGÉTICO  
ESTIMADO PARA EDIFÍCIOS**

CURITIBA

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: AMBIENTE CONSTRUÍDO E GESTÃO

MONALISA COELHO MARTINS

**O TRATAMENTO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL NAS NORMAS  
TECNICAS BRASILEIRAS E SEU IMPACTO NO CONSUMO ENERGÉTICO  
ESTIMADO PARA EDIFÍCIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – (PPGCC), Área de concentração em ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Aloísio Leoni Schmid

CURITIBA

2017

---

M386t

Martins, Monalisa Coelho

O tratamento da resistência térmica superficial nas normas técnicas brasileiras e seu impacto no consumo energético estimado para edifícios / Monalisa Coelho Martins. – Curitiba, 2017.

113 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2017.

Orientador: Aloísio Leoni Schmid .

Bibliografia: p. 109-113.

1. Resistência de materiais. 2. Análise térmica. 3. Edifícios – Propriedades térmicas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Schmid, Aloísio Leoni. III. Título.

CDD: 620.112

---



Ministério da Educação  
Universidade Federal do Paraná  
Setor de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil

**ATA DE DEFESA DA 281ª. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PPGECC-UFPR**

No dia 2 de junho de 2017, às 9h00 compareceram à sala PD06 do Departamento de Arquitetura e Urbanismo a candidata ao título de Mestre em Engenharia de Construção Civil Monalisa Coelho Martins e a comissão de avaliação, constituída pelos professores George Stanescu (PPGECC), Vitoldo Swinka Filho (LACTEC e DEMEC-UFPR) e Aloísio Leoni Schmid (PPGECC), orientador, para a ducentésima octogésima primeira defesa de dissertação de Mestrado do PPGECC – área Ambiente Construído e Gestão. Foi instituída a sessão de pelo Prof. Aloísio, apresentando a banca e agradecendo sua presença, e foi logo iniciada a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “O TRATAMENTO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL NAS NORMAS TÉCNICAS BRASILEIRAS E SEU IMPACTO NO CONSUMO ENERGÉTICO ESTIMADO PARA EDIFÍCIOS”, com duração de 40 minutos. Concluída a apresentação, foi iniciada a arguição pela banca. Concluída essa etapa, foi aberta a palavra aos presentes. Reunida em sessão exclusiva, a banca deliberou pela aprovação da candidata em conformidade com a resolução nº 65/2009-CEPE-UFPR, observada a necessidade de reapresentação da dissertação com os ajustes solicitados pelos avaliadores. Eu, Aloísio Leoni Schmid lavrei esta ata que vai assinada por mim e pelos avaliadores.

Prof. Dr. George Stanescu

Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

Prof. Dr. Aloísio Leoni Schmid (orientador)

*Dedico esse trabalho a  
Moacir (In memoriam), Célia e Rafael.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer inicialmente aos professores e pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil – UFPR, em especial ao professor Dr. Aloísio Leoni Schmid que considero um excelente orientador, sempre auxiliando com o seu conhecimento para a elaboração deste projeto e, principalmente, pela confiança depositada em todo o período do projeto.

Aos Institutos LACTEC pelo grande apoio na elaboração deste projeto e também pela infraestrutura disponibilizada.

A minha família, especialmente a minha mãe Célia e minha vó Elvira, que sempre me incentivaram e ajudaram a continuar seguindo em frente buscando sempre o melhor para mim. Obrigada pelo carinho, amor, apoio e pelas valiosas orientações para a vida.

Ao meu esposo Rafael Martins, que permaneceu do meu lado sempre me incentivando e encorajando em todos os desafios, e principalmente por permitir o meu crescimento profissional.

Agradeço a todos os amigos do LACTEC pelo apoio e carinho, em especial a Camila. Nesse período percebi que o aprendizado é uma construção diária cujo ingrediente principal é o afeto.

E finalmente, gostaria de agradecer à UFPR pelo ensino gratuito de qualidade e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGECC por oferecer a oportunidade de cursar o Mestrado na área de Ambiente Construído.

*“Não deve haver limites para o esforço humano. Somos todos diferentes. Por pior que a vida possa parecer, sempre haverá algo que podemos fazer e obter sucesso, logo, enquanto houver vida, haverá esperança”.*

***Stephen Hawking***

## RESUMO

O aprimoramento do desempenho térmico de edificações pode contribuir para o uso eficiente da energia e conservação do meio ambiente. Um dos parâmetros utilizados no cálculo do desempenho térmico é a resistência térmica superficial, cujo cálculo envolve o coeficiente convectivo de transmissão de calor. A norma brasileira ABNT NBR 15220-2 “Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações”, de 2005, sugere alguns valores de coeficientes convectivos a serem usados em projetos. Contudo, a norma não fornece informações sobre o cálculo utilizado para a obtenção desses valores. Após revisão bibliográfica, foi identificado o cálculo, bem como outros métodos para determinar os coeficientes convectivos. Constatou-se que a obtenção dos coeficientes convectivos externos depende principalmente do vento, e os coeficientes convectivos internos dependem da diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente interno. Após inserir tais valores de velocidade de vento e de temperatura, foi evidenciado que os resultados obtidos se mostraram diferentes para cada método. Devido a variação climática no Brasil foi definida, para cada zona bioclimática, uma cidade representativa, e foram realizadas simulações de cálculo de demanda de energia, considerando valores diferentes de coeficientes convectivos. Os resultados demonstraram que o método sugerido pela NBR 15220-2 (ABNT 2005) na maioria dos casos pode fornecer valores de demanda energética acima daquela obtida por outros métodos, resultando em um superdimensionamento de sistemas de condicionamento térmico, com potência até 57,3,0% maior. Contudo, em alguns casos, houve evidências de subdimensionamento, deixando clara a importância da análise para diferentes condições climáticas.

Palavras-chave: Coeficiente convectivo. Resistência térmica superficial. Desempenho térmico de edifícios.



## **ABSTRACT**

Improving the thermal performance of buildings can contribute to energy efficiency and conservation of the environment. One of the parameters used in the calculation of the thermal performance is the thermal resistance, whose calculation involves the convective coefficient of heat transmission. The Brazilian standard ABNT NBR 15220-2 "Thermal performance of buildings Part 2: Methods of calculation of thermal transmittance, thermal capacity, thermal delay and solar factor of elements and components of buildings" of 2005 suggests some values of convective coefficients to be used in projects, however, the standard does not provide information on the method used to obtain these values. After a bibliographic review, this method was identified, as well as several others, for the calculation of the convective coefficients. It was verified that the methods to obtain the external convective coefficients depend mainly on the wind, and the internal convective coefficients depend on the temperature difference between the surface and the internal environment. After inserting the same values of wind velocity and temperature, it was evidenced that the results obtained were different for each method. The climatic variation in Brazil was verified to comprise eight bioclimatic zones, classified according to data on maximum average temperature, minimum average temperature and relative humidity. For each bioclimatic zone, a representative city was defined, and energy demand calculation simulations were performed, considering different values of convective coefficients. The results showed that the method suggested by NBR 15220-2 (ABNT 2005) in most cases can provide values of energy demand above that obtained by other methods, resulting in an oversizing of air conditioning systems, with power up to 57,3% higher than other methods. However, in some cases, there was evidence of undersizing, making clear the importance of the analysis being performed for different climatic conditions.

**Keywords:** Convective coefficient. Surface thermal resistance. Thermal performance of buildings.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1.1 - TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA EM ALGUNS ESTADOS<br>BRASILEIROS .....   | 19 |
| FIGURA 1.2 - PREVISÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ATÉ 2030.....  | 27 |
| FIGURA 2.2 - DEPENDÊNCIA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA COM A<br>TEMPERATURA E PRESSÃO .....   | 34 |
| FIGURA 2.3 - CAMADA LIMITE TÉRMICA .....   | 35 |
| FIGURA 2.3 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO TÉRMICA.....   | 39 |
| FIGURA 2.5 - PODER EMISSIVO DO CORPO NEGRO EM FUNÇÃO DO<br>COMPRIMENTO DE ONDA E TEMPERATURA .....   | 40 |
| FIGURA 2.6 - FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DE UMA PAREDE PLANA. (A)<br>SISTEMA TÉRMICO. (B) SISTEMA ELÉTRICO .....                                | 42 |
| FIGURA 2.7 - A) TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SÉRIE E EM PARALELO<br>ATRAVÉS DE UMA PAREDE COMPOSTA. B) CIRCUITO ELÉTRICO<br>EQUIVALENTE. .... | 45 |
| FIGURA 2.7 - ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO .....  | 48 |
| FIGURA 4.1: DEFINIÇÕES DOS LOCAIS DAS VELOCIDADES DE VENTO .....   | 65 |
| FIGURA 4.2 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO COM A<br>VELOCIDADE DO VENTO .....   | 71 |
| FIGURA 4.3 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO COM A<br>DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE A SUPERFÍCIE E O AMBIENTE .....              | 73 |
| FIGURA 4.4 - EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS ANDARES .....   | 79 |
| FIGURA 4.5 – ELEVAÇÃO FRONTAL DO AMBIENTE DA EDIFICAÇÃO .....  | 80 |
| FIGURA 4.6 - ISOMÉTRICA DO AMBIENTE DA EDIFICAÇÃO .....  | 80 |
| FIGURA 4.7 - ENERGIA TOTAL NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE<br>20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA .....                             | 82 |
| FIGURA 4.8 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS<br>MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C .....                           | 83 |
| FIGURA 4.9 - ENERGIA TOTAL NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE<br>20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA.....                              | 85 |
| FIGURA 4.10 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS<br>MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C .....                          | 85 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 4.11 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA .....         | 87 |
| FIGURA 4.12 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C ..... | 87 |
| FIGURA 4.13 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA .....         | 89 |
| FIGURA 4.14 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C.....  | 89 |
| FIGURA 4.15 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA .....         | 91 |
| FIGURA 4.16 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C ..... | 91 |
| FIGURA 4.17 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA .....         | 93 |
| FIGURA 4.18 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C ..... | 93 |
| FIGURA 4.19 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA .....         | 95 |
| FIGURA 4.20 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C ..... | 95 |
| FIGURA 4.21 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA .....         | 97 |
| FIGURA 4.22 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C ..... | 97 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1.1- PREVISÃO DE ELETRODOMÉSTICOS A CADA 100 HABITANTES    |    |
| ATÉ 2024 .....  | 25 |
| TABELA 1.2 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ATÉ 2024 .....        | 26 |
| TABELA 2.1 - DADOS DE DIAS TÍPICOS DE INVERNO E VERÃO DE ALGUMAS  |    |
| CIDADES BRASILEIRAS E SUAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS .....              | 49 |
| TABELA 4.1 - RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL INTERNA E EXTERNA    |    |
| SUGERIDAS PELA NBR 15220-2 (ABNT 2005) .....                      | 60 |
| TABELA 4.2 - COEFICIENTE DE TROCA DE CALOR POR CONVECÇÃO INTERNO  |    |
| .....   | 62 |
| TABELA 4.3 - VALORES DE EMISSIVIDADE, TEMPERATURA E VELOCIDADE DO |    |
| VENTO UTILIZADOS PELA ISO 6946:2007. ....                         | 63 |
| TABELA 4.4 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE            |    |
| CONVECTIVO EXTERNO .....  | 64 |
| TABELA 4.5 - PARÂMETROS DO MODELO MCADAMS .....                   | 65 |
| TABELA 4.6 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE            |    |
| CONVECTIVO INTERNO.....   | 66 |
| TABELA 4.7 - CIDADES A SEREM UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES.....       | 68 |
| TABELA 4.8 - COMBINAÇÕES DE VALORES DE COEFICIENTES A SEREM       |    |
| USADOS DAS SIMULAÇÕES.....  | 76 |
| TABELA 4.9 - VALORES DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....                | 79 |
| TABELA 4.10 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE  |    |
| 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM CURITIBA .....            | 81 |
| TABELA 4.11 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20  |    |
| °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA.....                            | 84 |
| TABELA 4.12 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE  |    |
| 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM SANTA MARIA .....         | 84 |
| TABELA 4.13 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20  |    |
| °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA.....                            | 86 |
| TABELA 4.14 ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE    |    |
| 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM BELO HORIZONTE.....       | 86 |
| TABELA 4.15 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20  |    |
| °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA.....                            | 88 |

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 4.16 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM BRASÍLIA.....              | 88  |
| TABELA 4.17 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA.....                             | 90  |
| TABELA 4.18 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM VITÓRIA DA CONQUISTA ..... | 90  |
| TABELA 4.19 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA.....                             | 92  |
| TABELA 4.20 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM CAMPO GRANDE .....         | 92  |
| TABELA 4.21 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA.....                             | 94  |
| TABELA 4.22 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM CUIABÁ.....                | 94  |
| TABELA 4.23 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM CUIABÁ .....                  | 96  |
| TABELA 4.24 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM BELÉM .....                | 96  |
| TABELA 4.25 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM SANTA MARIA.....              | 98  |
| TABELA 4.26A - COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA MÁXIMA ENTRE A DEMANDA DE ENERGIA DA NBR 15220 E A DEMANDA MÍNIMA DE ENERGIA.....             | 102 |
| TABELA 4.26B - COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA MÁXIMA ENTRE A DEMANDA DE ENERGIA DA NBR 15220 E A DEMANDA MÁXIMA .....                       | 103 |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>18</b> |
| 1.1      | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....   | 21        |
| 1.2      | PROBLEMATIZAÇÃO .....  | 21        |
| 1.3      | HIPÓTESE .....   | 23        |
| 1.4      | OBJETIVO .....   | 24        |
| 1.5      | JUSTIFICATIVA .....  | 24        |
| 1.5.1    | ASPECTOS AMBIENTAIS .....  | 28        |
| 1.5.2    | ASPECTOS ECONÔMICOS .....  | 29        |
| 1.5.3    | ASPECTOS TECNOLÓGICOS .....  | 30        |
| 1.5.4    | ASPECTOS SOCIAIS .....   | 30        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>31</b> |
| 2.1      | Mecanismos de transferência de calor .....   | 31        |
| 2.1.1    | Transferência de calor por condução .....  | 31        |
| 2.1.2    | Transferência de calor por convecção .....   | 34        |
| 2.1.3    | Transferência de calor por radiação .....  | 37        |
| 2.2      | Resistência térmica .....  | 42        |
| 2.3      | Considerações sobre os mecanismos de transferência de calor .....  | 46        |
| 2.4.1    | Considerações sobre as variações climáticas no Brasil .....  | 50        |
| <b>3</b> | <b>MÉTODO .....</b>  | <b>55</b> |
| 3.1      | DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA .....  | 55        |
| 3.1.1    | Unidade de análise .....   | 55        |
| 3.1.2    | Delimitação do trabalho .....  | 55        |
| 3.1.3    | Justificativa da escolha a partir do objetivo .....  | 56        |
| 3.1.4    | Testes de validade .....   | 56        |
| 3.2      | COLETA DE DADOS .....  | 57        |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE DO IMPACTO DOS DIFERENTES MÉTODOS PARA CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS SUPERFICIAIS .....</b> | <b>59</b> |
| 4.1      | MÉTODOS PARA CÁLCULO DOS COEFICIENTES CONVECTIVOS SUPERFICIAIS .....                                       | 59        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1.1    | Método da ABNT NBR 15220-2 (ABNT 2005).....  | 59         |
| 4.1.2    | Método da ISO 6946:2007.....   | 61         |
| 4.1.3    | Métodos desenvolvidos empiricamente.....   | 63         |
| 4.1.4    | Considerações sobre os métodos para cálculo dos coeficientes convectivos superficiais .....              | 67         |
| 4.2      | DETERMINAÇÃO DE LOCAIS COM VARIAÇÃO CLIMÁTICA PARA SIMULAÇÃO.....  | 68         |
| 4.3      | DEMANDA DE ENERGIA CONSIDERANDO DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO SUPERFICIAL..... | 69         |
| 4.3.1    | Variação dos coeficientes convectivos utilizando diferentes valores climáticos .....                     | 69         |
| 4.3.1.1  | Coeficiente convectivo externo.....  | 69         |
| 4.3.1.2  | Coeficiente convectivo interno.....  | 72         |
| 4.3.2    | Determinação dos valores a serem utilizados nas simulações .....   | 75         |
| 4.3.3    | Simulação .....  | 77         |
| 4.4      | RESULTADOS .....   | 81         |
| 4.4.1    | Curitiba - Z1 .....  | 81         |
| 4.4.2    | Santa Maria - Z2.....  | 84         |
| 4.4.3    | Belo Horizonte – Z3.....   | 86         |
| 4.4.4    | Brasília – Z4.....   | 88         |
| 4.4.5    | Vitória da Conquista – Z5 .....  | 90         |
| 4.4.6    | Campo Grande - Z6.....   | 92         |
| 4.4.7    | Cuiabá – Z7 .....  | 94         |
| 4.4.8    | Belém – Z8.....  | 96         |
| 4.5      | Análise dos resultados.....  | 98         |
| 4.5.1    | Curitiba - Z1 .....  | 98         |
| 4.5.2    | Santa Maria – Z2 .....   | 99         |
| 4.5.3    | Belo Horizonte e Brasília – Z3 e Z4.....   | 99         |
| 4.5.4    | Vitória da Conquista – Z5 .....  | 100        |
| 4.5.5    | Campo Grande e Cuiabá – Z6 e Z7.....   | 100        |
| 4.5.6    | Belém –Z8 .....  | 100        |
| 4.5.7    | Resumo .....   | 101        |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>104</b> |
| <b>6</b> | <b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>   | <b>107</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>108</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

As edificações devem oferecer condições térmicas compatíveis com o conforto térmico humano, sejam quais forem as condições climáticas externas. As principais variáveis climáticas que afetam o conforto térmico são temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do ar e o campo radiante. Essas variáveis têm correlação com o a latitude e a altitude, o regime de chuvas e ventos, vegetação, permeabilidade do solo, águas superficiais e subterrâneas, topografia, entre outras características locais que podem ser alteradas pela presença humana. Com o conhecimento do clima, dos mecanismos de trocas de calor e do comportamento térmico dos materiais, é possível a utilização racional da energia necessária para proporcionar o conforto térmico nas edificações, pois poder-se-ia evitar ou reduzir os sistemas de condicionamento artificial de ar, tanto para refrigerar quanto para aquecer os ambientes. (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Na década de setenta, a crise do petróleo serviu como alerta para que muitos países pesquisassem novas fontes de energia, porém, como as fontes disponíveis apresentavam custos mais altos, o uso racional de energia passou a ser a opção mais vantajosa, pois a redução do consumo evitaria a instalação de novos parques geradores. A consequência disso é que o desempenho térmico de edificações se tornou uma questão importante, pois os países usam grande quantidade de energia para climatizar o ambiente interior através de refrigeração artificial. (GOULART, 1993).

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE – que é um órgão ligado ao Governo Federal, em 2016, no Brasil, as elevadas temperaturas registradas nas regiões Sul e Sudeste em abril, assim como as temperaturas mínimas muito baixas verificadas no mês de junho na região Sul, contribuíram para o aumento da demanda de energia dos correspondentes subsistemas. A previsão é que o crescimento médio da carga de energia até 2020 deve ser de 3,7% ao ano, significando uma expansão média anual de 2.589 MW médios. (MME, 2016). Associado a isso, as fontes limpas e renováveis de energia, tal como hidrelétricas, são cada vez

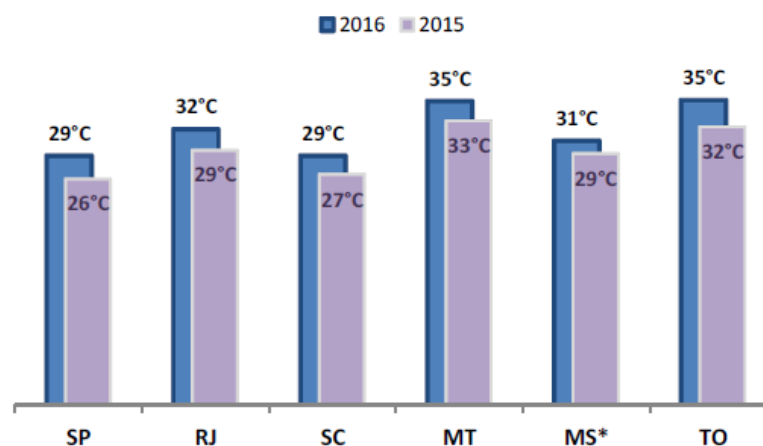


mais escassas, e o Brasil possui dificuldades para construí-las por questões políticas e de gestão.

Portanto, percebe-se que a eficiência energética se torna cada vez mais importante, e nesse contexto as edificações possuem papel de destaque, pois quase metade da energia consumida no país se deve a elas. (PROCEL, 2016).

A questão térmica possui relevância nesse contexto. As altas temperaturas no verão causaram na classe residencial, em abril de 2016, um aumento no consumo de energia de 7,5% em relação a 2015. Embora as vendas de aparelhos de ar condicionado tenham registrado queda no último ano, o desconforto causado pelas altas temperaturas no mês levou à intensificação do uso desses equipamentos nos domicílios, mesmo com o peso da energia elétrica no orçamento familiar, indicando a importância desse equipamento. Esta influência da temperatura foi notada em vários estados, e a maior contribuição para o crescimento do consumo veio da região Sudeste. São Paulo e Rio de Janeiro, que representam cerca de 40,0% do consumo total da classe residencial, assinalaram crescimento de 9,7% e 12,2%, respectivamente. No Sul, o crescimento foi de 10,7% em Santa Catarina, 5,9 %, no Paraná e 1,4%, no Rio Grande do Sul. No Centro-Oeste, destacaram-se Mato Grosso com aumento de 13,5% e Mato Grosso do Sul, 10,2%. No Norte, Tocantins teve aumento de 11,9 % e Amapá teve 11,2%. O aumento em abril no Nordeste foi de 3,9%. Na Figura 1.1 é ilustrado o aumento de temperatura média das máximas de 2015 e 2016 de alguns estados brasileiros. (EPE, 2016).

FIGURA 1.1 - TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA EM ALGUNS ESTADOS BRASILEIROS



FONTE: EPE, 2016

Ao verificar os dados nota-se a importância de uma edificação adaptada ao clima para que seu desempenho energético seja alto, pois ao usar a energia de forma racional, evita-se a necessidade de novos parques geradores.

Segundo Dias et al. (2001), o termo racionalização de energia refere-se a técnicas e procedimentos que visam reduzir o desperdício e o uso da energia, principalmente elétrica, sem comprometer a produção. O termo eficiência energética, nesse contexto, está ligado mais fortemente às tecnologias, materiais e equipamentos, que podem desenvolver a mesma função com um gasto energético menor.

O processo para um projeto de edifício energeticamente eficiente pode ser dividido em quatro etapas. A primeira está relacionada ao ajuste ambiental, no qual é feito o levantamento de elementos climáticos de um dado local com a análise de dados meteorológicos. A segunda etapa consiste em avaliar o impacto do clima em termos psicofisiológicos, no qual o abrigo deve ser projetado para satisfazer suas necessidades biológicas. Na terceira etapa soluções tecnológicas devem ser aplicadas para cada problema conforto-clima, sendo obtidas através de métodos de cálculo, nos quais se analisariam a orientação, forma da edificação, movimento do ar e, ainda, a temperatura interna que pode ser conseguida com o uso de determinados materiais. Por fim, na última etapa, essas soluções seriam somadas de acordo com a sua importância, resultando em uma harmonia arquitetônica. (OLGYAY, 1973).

Percebe-se, portanto, que na fase de projeto é necessária a utilização de dados do clima e dos materiais empregados, para o correto dimensionamento do desempenho térmico das edificações. Segundo a NBR 15220-3 (ABNT 2005) *“Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social”*, o Brasil está dividido em oito diferentes zonas bioclimáticas relativamente homogêneas quanto ao clima. Assim, nota-se que é importante o conhecimento desses dados para que sejam obtidos projetos mais precisos e, com isso, obter um melhor desempenho térmico para as edificações. Uma forma de fazer isso é através da análise dos métodos utilizados para cálculo das resistências térmicas, que são resultado dos mecanismos de troca de calor e têm impacto direto no projeto térmico.

## 1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente documento está estruturado da seguinte forma: no primeiro capítulo é contextualizado o problema de pesquisa, são formulados objetivos, bem como as contribuições ambientais, as tecnológicas e as sociais, justificando a relevância do presente trabalho.

No capítulo dois, é apresentada a revisão bibliográfica com foco em mecanismos de transferência de calor e as teorias sobre o transporte de energia térmica. Ao final desse capítulo, também é apresentada a variação do clima no Brasil e sua classificação, segundo normas voltadas para a construção de edificações.

São apresentados no capítulo três os métodos a serem utilizados no desenvolvimento do trabalho, bem como a forma de levantamento dos dados necessários para a sua execução.

No quarto capítulo é detalhada a forma com a qual a análise das resistências térmicas superficiais foi realizada, seguindo a metodologia descrita no capítulo anterior. Neste capítulo são descritos diversos métodos disponíveis na literatura para o cálculo das resistências térmicas superficiais, que serão usados para posterior análise. Também são expostos os resultados obtidos.

No capítulo cinco são apresentadas as conclusões e no sexto as sugestões de trabalhos futuros. Após o capítulo seis estão contidas as referências bibliográficas.

## 1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Para o estudo do desempenho térmico das edificações, entre os diversos dados utilizados, os valores dos coeficientes superficiais de transferência de calor dos materiais são importantes, pois têm papel na determinação da quantidade de energia que é transferida de um meio ao outro, através das paredes, janelas e telhados. Esses coeficientes dependem basicamente da geometria da superfície, da natureza do escoamento do fluido, das propriedades termodinâmicas, entre outras, o que

torna o cálculo relativamente complexo. Existem vários métodos disponíveis na literatura e estes podem levar a resultados muito diferentes para um mesmo problema. (HOLMAN, 1981).

Neste contexto várias pesquisas na área vêm se desenvolvendo com a utilização de ferramentas computacionais para prever e avaliar o comportamento térmico das edificações. Sabe-se que a transferência de calor das superfícies externas é a principal causa do consumo de energia dos edifícios e consiste em duas partes: convecção e radiação. De acordo com Palyvos (2008), as perdas de calor por convecção são de três a quatro vezes mais elevadas do que as perdas de calor por radiação.

No Brasil, a norma ABNT NBR 15220-2 – “*Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*” de 2005 sugere valores de coeficientes superficiais de transferência de calor, porém, esses valores são normalmente utilizados em todo o país sem diferenciação de acordo com as zonas bioclimáticas. Contudo, é importante certificar-se de que o método escolhido é aderente à sua aplicação, para se obter resultados mais próximos da realidade. Associado a isso, sabe-se, também, que existe um desvio entre os estudos experimentais, que são realizados sob condições controladas, e a realidade dos fenômenos ocorridos em campo. (MORRISON; GILLIAERT, 1992).

Portanto, devido às evidências de incertezas e desvios na modelagem dos mecanismos de troca de calor, que resultam nos valores das resistências térmicas superficiais, o problema de pesquisa é colocado da seguinte forma: qual a origem do método usado na norma ABNT NBR 15220-2 “*Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*” de 2005 para cálculo das resistências térmicas superficiais? Qual seria o impacto no dimensionamento de demanda de energia ao se utilizar métodos diferentes daquele?

### 1.3 HIPÓTESE

A grande extensão do território brasileiro faz com que existam vários subtipos de clima. O clima predominante no Brasil é o tropical, e é influenciado por suas coordenadas geográficas, contudo, o clima brasileiro, para uma melhor padronização, está dividido em oito regiões relativamente homogêneas, denominadas de zonas bioclimáticas. Para cada uma dessas zonas são definidos um dia típico de inverno e um dia típico de verão. (SIQUEIRA et al., 2005).

Em edificações, pode ser necessário um sistema de aquecimento e/ou refrigeração artificial para manter a temperatura interna dentro de uma faixa que permita o conforto térmico. O dimensionamento desse sistema depende de como são realizadas as trocas de calor através das paredes, pisos, telhados e janelas da edificação.

De uma forma simplificada, a troca de calor na superfície de uma edificação ocorre por radiação e convecção. A troca por radiação é geralmente obtida através dos valores da absorvidade, emissividade e temperatura da superfície. Já a transferência de calor na convecção depende das condições do fluxo de ar e da distribuição de temperatura nas camadas deste, normalmente obtidas com base em estudos experimentais que caracterizem bem o ar na sua interface com o sólido.

Os valores dos coeficientes superficiais de transferência de calor, nas normas brasileiras, são considerados com igual valor para todo o Brasil. Contudo, acredita-se que esses coeficientes podem estar com valores acima do real, talvez por questões de segurança: em condições de ambiente externo frio, os valores de coeficientes acima do real causariam um superdimensionamento no sistema de aquecimento, pois haveria maior perda de calor e, por consequência, maior gasto energético. O maior gasto energético implica que a potência do sistema de aquecimento deve ser maior. Se estiver acima do necessário, esse superdimensionamento garantiria que o ambiente interno pudesse ser aquecido.

Outro impacto dessa superestimação é que, no caso de superdimensionamento do sistema de aquecimento isso poderia causar ineficiência em projetos térmicos de regiões quentes do país onde, com o uso apenas de sistemas passivos (uso de materiais e arquitetura diferentes), seria possível manter o ambiente interno

aquecido, dentro da faixa de temperatura desejada, dispensando a compra de equipamentos, gerando benefícios a todos, exceto para os fabricantes de sistemas de aquecimento.

Portanto, com a análise da demanda de energia e da potência, seria possível avaliar os impactos para diferentes métodos de obtenção dos valores dos coeficientes superficiais, levando em consideração diferentes regiões climáticas.

#### 1.4 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é analisar diferentes métodos utilizados na determinação dos coeficientes térmicos superficiais, e verificar o impacto no dimensionamento de sistemas de condicionamento térmico em relação aos resultados obtidos pelo método normatizado no Brasil.

#### 1.5 JUSTIFICATIVA

Atualmente, devido à complexidade dos cálculos para dimensionamento térmico das edificações, as ferramentas computacionais são muito utilizadas. Existem divergências entre os programas de simulação térmica, e uma importante divergência pode estar relacionada aos diferentes métodos utilizados para determinar os valores dos coeficientes superficiais de transferência de calor. (OBYN; MOESEKE, 2015).

A partir de alguns estudos, foi verificado que o uso de diferentes valores para os coeficientes de transferência de calor por convecção pode resultar em diferenças de 20,0% a 40,0% no consumo de energia estimado para o edifício. (EMMEL et al., 2007; SHAO et al., 2009). Para o coeficiente de convecção interno essas diferenças podem ser de até 8,0%. (PEETERS et al., 2011).

Esses números são de grande interesse, justificando uma busca de valores mais precisos desses coeficientes, pois, com isso, seria possível desenvolver projetos de condicionamento térmico mais seguros, garantindo a faixa de conforto térmico almejada, e mais eficientes, o que iria ao encontro da política energética atual, pois o uso racional da energia é um importante vetor no atendimento da demanda nacional,

contribuindo para a segurança energética, para a competitividade da economia e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. (EPE; MME, 2016).

Com a eficiência em projetos térmicos de edificações poder-se-ia diminuir o consumo de energia para condicionamento de ar. Segundo a EPE na última década houve um grande aumento na compra de sistemas de ar-condicionado, o que vem causando no sistema elétrico a queda de índices de desempenho, tais como desligamentos e qualidade de energia, para abaixo dos níveis comparativos em outros países, como a China. Na Tabela 1.1 é mostrada a previsão de equipamentos de ar condicionado no Brasil até 2024. (EPE; MME, 2016).

Percebe-se que há previsão de crescimento de aproximadamente 40,0% na quantidade de equipamentos de ar condicionado até 2024. Na Tabela 1.2 é mostrado o aumento no consumo de energia elétrica devido a esses equipamentos.

TABELA 1.1- PREVISÃO DE ELETRODOMÉSTICOS A CADA 100 HABITANTES ATÉ 2024

| Equipamento                    | Posse média (equipamentos por 100 domicílios) |      |      |      |      |
|--------------------------------|---|------|------|------|------|
|                                | Vida útil (anos)                              | 2014 | 2015 | 2019 | 2024 |
| Ar condicionado                | 15  | 23   | 24   | 26   | 32   |
| Refrigerador                   | 15  | 103  | 104  | 103  | 103  |
| Freezer                        | 15  | 18   | 18   | 17   | 15   |
| Chuveiro Elétrico <sup>1</sup> | 15  | 66   | 66   | 62   | 58   |
| Máquina de lavar roupas        | 15  | 69   | 70   | 76   | 79   |
| Televisão                      | 10  | 171  | 183  | 192  | 198  |
| Lâmpadas <sup>2</sup>          | 8   | 821  | 829  | 855  | 882  |

Notas: 1- Corresponde ao número de domicílios que utilizam exclusivamente o chuveiro elétrico.

2- Número médio de lâmpadas por domicílio.

FONTE: Adaptado EPE, 2016.

A Tabela 1.2 demonstra que em relação a 2014, o consumo de energia elétrica dos equipamentos de ar condicionado no Brasil deverá dobrar até 2024. Cabe destacar que, num horizonte de longo prazo, a energia conservada devido a ações de eficiência energética tem papel importante no atendimento à demanda futura de energia pela sociedade brasileira.

Além disso, a constante ameaça de blecaute no país intensificou a necessidade de novas medidas no campo do combate ao desperdício de energia. Como as novas tecnologias de eficiência energética estão amplamente difundidas, deve-se identificar aquelas que irão ser mais eficazes e seguras ao longo prazo. Com as

inúmeras medidas propostas, tem-se de optar por compensações nos setores ambiental, energético financeiro e social, a fim de alcançar a melhor solução possível, que garanta a maximização da eficiência energética e satisfaça as necessidades do usuário final. (SOLA, A. V. H., 2004; DIAKAKI et al., 2008; RODRIGUES et al., 2007).

TABELA 1.2 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ATÉ 2024

| <b>Equipamento (GWh)</b> | <b>2014</b>    | <b>2015</b>    | <b>2019</b>    | <b>2024</b>    |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ar condicionado          | 17,126         | 18,658         | 26,23          | 36,216         |
| Refrigerador             | 22,396         | 22,609         | 23,329         | 24,685         |
| Freezer                  | 5,964          | 5,865          | 5,508          | 5,428          |
| Lâmpadas                 | 18,552         | 18,019         | 12,67          | 9,856          |
| Chuveiro elétrico        | 21,324         | 21,671         | 22,708         | 23,979         |
| Máquina de lavar roupas  | 2,914          | 2,999          | 3,385          | 3,729          |
| Televisão                | 19,232         | 20,883         | 23,152         | 25,472         |
| Outros                   | 24,542         | 24,642         | 39,285         | 67,829         |
| <b>Total</b>             | <b>132,050</b> | <b>135,346</b> | <b>156,267</b> | <b>197,194</b> |

FONTE: Adaptado EPE, 2016.

O consumo faturado de energia elétrica para as edificações no país corresponde a cerca de 45,0% do total. Estima-se um potencial de redução deste consumo em 50,0% para novas edificações e de 30,0% para aquelas que promoverem reformas que contemplem os conceitos de eficiência energética em edificações. (PROCEL, 2016). Portanto, a economia de energia não significa apenas redução do custo final da fatura, mas uma atitude contra o desperdício. Existem desperdícios por falta de um controle adequado, por falta de manutenção, ou mau uso das instalações prediais. (MASCARÓ; MASCARÓ, 1992).

Essa redução de consumo através da eficiência é importante pois mesmo com um possível cenário econômico desfavorável há a tendência de aumento de consumo de energia. No Plano Nacional de Energia – PNE 2030 – foram estabelecidos quatro possíveis cenários até o ano de 2030, para realização de previsões de consumo. Esses cenários receberam os nomes de: Na Crista da Onda, Surfando a Marola, Pedalinho e Náufrago. (BRASIL, 2007).

O cenário Na Crista da Onda é caracterizado por um elevado nível de desenvolvimento econômico, marcado por uma gestão macroeconômica mais eficaz, superando o desenvolvimento médio mundial.



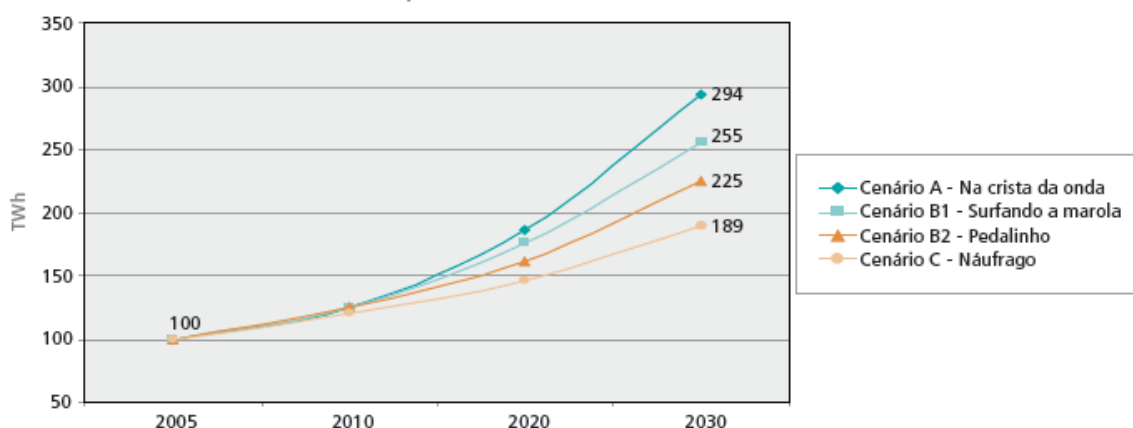
No cenário Surfando a Marola, o crescimento da economia brasileira supera um crescimento mais moderado da economia mundial, fruto de uma gestão mais ativa no encaminhamento dos problemas internos. Há, porém, um processo mais longo na consolidação da estabilidade macroeconômica, resultado, em parte, de certa dificuldade na aprovação de reformas microeconômicas.

No cenário Pedalinho, o crescimento do país é equivalente ao do cenário mundial, por causa da dificuldade de enfrentar os problemas estruturais internos. Dessa forma, a gestão macroeconômica é mais turbulenta, resultado, entre outros, da dificuldade de aprovação de reformas microeconômicas.

No cenário Náufrago, o crescimento do Brasil é no máximo igual ao da média mundial que, afetada pela crise advinda da ruptura das condições macroeconômicas dos EUA, é baixo. As vantagens comparativas não são potencializadas e as poucas oportunidades de crescimento, mesmo em um ambiente externo mais conturbado, são desperdiçadas. O país vive mais um período de décadas perdidas, com importante reversão no processo de consolidação da estabilidade macroeconômica.

Assim, considerando esses quatro cenários, foi realizado um extenso estudo para realizar o planejamento energético do Brasil. No gráfico da Figura 1.2 é apresentada a previsão de consumo de energia até 2030. Esses estudos e previsões envolvem muitas variáveis, por isso, o PNE é atualizado com no mínimo dez anos de intervalo. Atualmente está sendo desenvolvido o PNE 2050, e quando for publicado, novas estimativas serão disponibilizadas.

FIGURA 1.2 - PREVISÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ATÉ 2030



FONTE: EPE, 2007.

Percebe-se ao analisar a Figura 1.2 que, segundo previsão do governo federal, mesmo no pior cenário econômico, o Náufrago, o Brasil terá um aumento do consumo de energia.

Portanto, devido à expressiva participação das edificações na demanda energética, devido à previsão do crescimento do consumo de energia e, devido às diversas ações do governo, através de estudos e programas de efficientização, fica evidente a importância de ações que resultem em projetos de edificações mais eficientes, tal como a proposta do presente trabalho de avaliação dos métodos de cálculo de resistências térmicas superficiais, usados nos projetos de demanda energética para conforto térmico.

### 1.5.1 ASPECTOS AMBIENTAIS

A expansão do consumo de energia apresenta alguns aspectos negativos. Um deles é a possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia e o outro é o impacto ao meio ambiente produzido por essa atividade. Há também os elevados investimentos exigidos na pesquisa de novas fontes e construção de novas usinas. (ANEEL, 2008).

Uma das maneiras mais modernas e utilizadas no mundo para conter a expansão do consumo sem comprometer qualidade de vida e desenvolvimento econômico tem sido o estímulo ao uso eficiente. O desenvolvimento sustentável e a busca de eficiência energética dividem duas necessidades: a primeira diz respeito às inovações tecnológicas e a segunda, a mudanças nos padrões de consumo. (ANEEL, 2008).

Com o objetivo de estimular o uso eficiente da eletricidade e atingir uma redução no consumo energético das edificações, o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – PROCEL EDIFICA foi instituído em 2003 pela ELEKTROBRAS/PROCEL. O programa atua em conjunto com o Ministério de Minas e Energia, o Ministério das Cidades, as universidades, os centros de pesquisa e entidades das áreas governamental, tecnológica, econômica e de desenvolvimento, além do setor da construção civil. O principal objetivo do programa é promover o uso racional da energia elétrica em edificações desde sua fundação, sendo que, com a

criação do PROCEL EDIFICA, as ações foram ampliadas e organizadas com o objetivo de incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação etc.) nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente, visto que, o consumo de energia elétrica nas edificações corresponde a cerca de 45% do consumo faturado no país. Com essas aplicações estima-se um potencial de redução deste consumo em 50% para novas edificações e de 30% para aquelas que promoverem reformas que contemplem os conceitos de eficiência energética. (PROCEL, 2006).

Portanto, a economia de energia através do dimensionamento mais preciso de sistemas de condicionamento térmico, vai de encontro com a atual postura do uso eficiente de energia com o objetivo de preservar os recursos naturais.

### 1.5.2 ASPECTOS ECONÔMICOS

No Brasil, a partir do racionamento de energia elétrica em 2001, o poder público e a opinião civil direcionaram suas ações para a redução do consumo de energia elétrica por meio de programas e leis de eficiência energética. Entende-se por eficiência energética a obtenção de um serviço com baixo dispêndio de energia, isto é, um edifício é mais eficiente energeticamente que o outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA. 1997).

Segundo o Balanço Energético Nacional, o aumento no consumo de energia elétrica no Brasil de 2001 a 2010 foi de 47,0%, sendo que os setores residencial, comercial e público juntos tiveram um aumento proporcional de 46,0%. Para o setor residencial, o consumo per capita teve um aumento no mesmo período de 34,0%. (BRASIL, 2011).

Verifica-se, portanto, que novos parques geradores devem ser construídos para atender o aumento de consumo. Contudo, se for possível economizar energia através de projetos mais eficientes, a demanda por novos empreendimentos de geração poderá ser menor, gerando economia para o país pois, segundo o Balanço Energético Nacional, as edificações são responsáveis por 45,0% do consumo total de energia elétrica. (MME, 2016).

### 1.5.3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS

Conforme citado anteriormente, estudos indicam que os diferentes métodos utilizados em ferramentas computacionais para a determinação dos valores dos coeficientes superficiais de transferência de calor podem resultar em diferenças de até 40,0% no consumo de energia de uma edificação. (EMMEL et al., 2007; SHAO et al., 2009). Se for possível avaliar o impacto de cada método, seria possível desenvolver ferramentas computacionais mais precisas, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico na área e também para o desenvolvimento de projetos com dimensionamento térmico mais eficiente em edificações.

### 1.5.4 ASPECTOS SOCIAIS

A demanda por habitações no Brasil cresce a cada ano. Segundo os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD – IBGE em 2013 o déficit habitacional total no Brasil era de 5.846.040,00 domicílios. Em 2014, o déficit habitacional aumentou para 6.068.062,00 domicílios. Para atender o mercado, as empresas do setor buscam industrializar o processo de construção visando, principalmente, rapidez e baixo custo. Com o desenvolvimento de projetos mais eficientes seria possível baixar o custo no dimensionamento de sistemas de condicionamento térmico, beneficiando famílias com menor poder aquisitivo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os temas relacionados ao presente trabalho se referem, principalmente, aos mecanismos de transferência de calor que têm influência nos cálculos de balanço energético de edificações.

As diferentes formas de troca de calor entre os materiais e o meio são representadas pelos coeficientes térmicos utilizados nos cálculos de demanda de energia de condicionamento térmico. Entre esses coeficientes pode-se citar o coeficiente superficial de transferência de calor, que é a unidade de análise do presente trabalho. Por esse motivo, esses mecanismos serão abordados nesse capítulo. Isso será realizado através da exposição dos conceitos físicos dos fenômenos.

Também será abordado a divisão do Brasil em diferentes regiões bioclimáticas, pois será realizada no desenvolvimento do trabalho uma análise sobre os impactos dos coeficientes superficiais para diferentes regiões do Brasil.

### 2.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor ocorre quando há energia trocada entre os corpos materiais e é causada pela diferença de temperatura entre os mesmos. O estudo da transferência de calor não visa apenas explicar como essa energia pode ser transferida, mas, também, avaliar as taxas em que esta interação ocorre sob certas condições especificadas. (HOLMAN, 1981).

A transferência de calor ocorre de três formas: a condução, que ocorre no nível molecular, a convecção, que ocorre com o movimento de fluidos, no nível macroscópico, e o radioativo, o qual não necessita de meio material para o transporte de energia. (MARTINS, 2015). Essas três formas serão descritas a seguir.

#### 2.1.1 Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução é obtida através da transferência de energia em um meio em virtude do movimento molecular. (BIRD et al., 2004).

Quando existe um gradiente de temperatura em um material, a experiência mostra que ocorre a transferência de calor da região que está com a temperatura mais elevada para a região com menor temperatura, conforme mostrado na equação (1).

$$\frac{Q}{A} \sim \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (1)$$

onde

$Q$  é a taxa de calor (W);

$A$  é a área normal à direção do fluxo de calor ( $m^2$ ).

$\Delta T$  é a diferença de temperatura entre dois pontos na direção do fluxo de calor (K);

$\Delta X$  é a distância entre dois pontos na direção do fluxo de calor (m);

Quando a constante de proporcionalidade é inserida na equação (1) tem-se a equação (2), que está apresentada na forma diferencial:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2)$$

onde

$q_x$  é a taxa de calor por unidade de área na direção  $x$  ( $W/m^2$ );

$k$  é a condutividade térmica do material ( $W/mK$ ).

A condutividade térmica do material representa sua capacidade de transferir calor, assim, o inverso da condutividade térmica representa a resistividade térmica, pois representa a capacidade do material de resistir à transferência de calor.

A equação (2) representa a lei de Fourier da condução de calor que quantifica os processos de transferência de calor. O sinal negativo é para satisfazer o segundo princípio da termodinâmica, ou seja, o calor deve fluir no sentido da temperatura decrescente.

Em meios isotrópicos, quando o fluxo de calor se propaga sem uma direção preferencial, pode-se escrever a equação (2) na sua forma tridimensional conforme a equação (3):

$$\mathbf{q} = -k\vec{\nabla}T \quad (3)$$

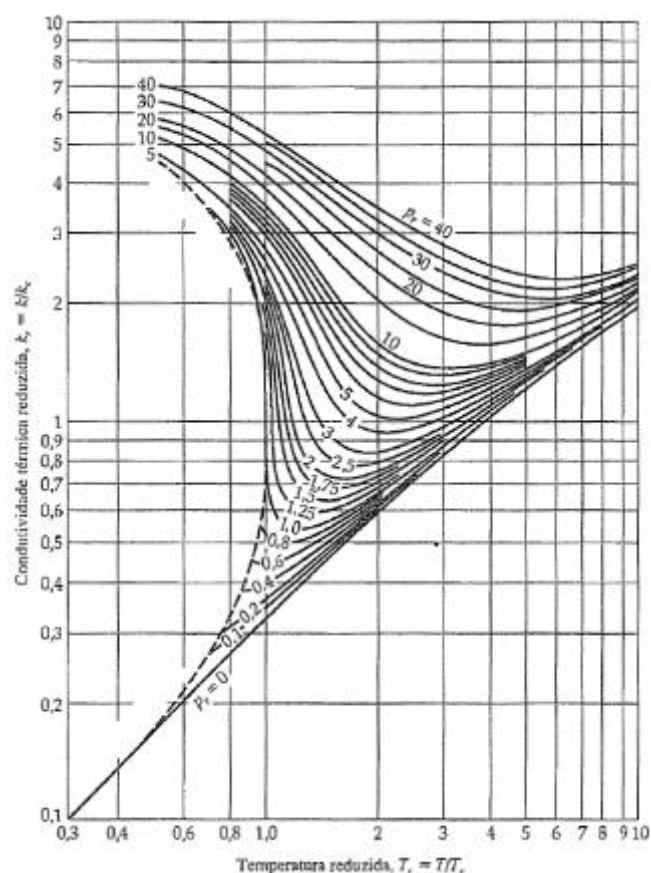
onde

$\vec{\nabla}$  é o operador nabla.

A condutividade térmica pode variar de 0,01 W/(mK), para gases, até 1000 W/(mK), como por exemplo em metais como a prata. Em cálculos, valores experimentais devem ser usados sempre que possível. Quando não é possível utilizar dados experimentais, pode-se fazer estimativas empregando diversos métodos ou consultando manuais de engenharia. (BIRD 2004).

Na Figura 2.2 é ilustrado um gráfico que expõe a dependência que tem a condutividade térmica de gases e líquidos da temperatura e da pressão. O gráfico é apresentado em termos da condutividade reduzida,  $k_r$ , que é a condutividade térmica dividida pela condutividade no ponto crítico,  $k_c$ , e, de forma análoga, a temperatura é dada pela temperatura reduzida  $T_r$ . O gráfico da Figura 2.2 é baseado em um número limitado de experiências em substâncias monoatômicas, contudo, a importância para o presente trabalho é fornecer uma visão global qualitativa sobre o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura e da pressão.

FIGURA 2.1 - DEPENDÊNCIA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA COM A TEMPERATURA E PRESSÃO



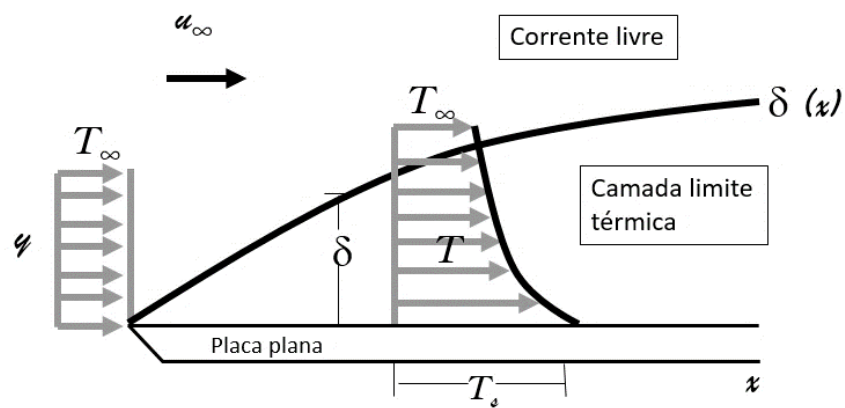
FONTE: BIRD et al, 2004.

### 2.1.2 Transferência de calor por convecção

A transferência de energia por convecção ocorre em meios fluidos e acontece com o movimento global e aleatório das moléculas. O movimento do fluido está associado ao fato que, em um instante qualquer, um grande número de moléculas está se movendo coletivamente. (INCROPERA et al., 2008). Para descrever o fenômeno da convecção próximo de paredes, usa-se a teoria da camada limite térmica. Para isso, aplica-se a modelagem de um escoamento permanente bidimensional de um fluido em torno de um objeto submerso tal entorno mostrado na Figura 2.3, e afirma-se que as principais variações de temperatura ocorrem em uma região muito fina, a camada limite térmica, com espessura  $\delta_t$ . Pode-se, assim, usar um sistema de coordenadas cartesianas com  $x$  apontando para jusante e  $y$  perpendicular à superfície sólida para representar o fenômeno. (BIRD et al, 2004).



FIGURA 2.2 - CAMADA LIMITE TÉRMICA



FONTE: Adaptada de Incropera et al., 2008.

Sabe-se que a espessura da camada limite térmica é uma função da distância  $x$  (com origem na borda da superfície plana), contudo, na equação (4) é apresentada uma relação típica para determinação de  $\delta_t$ .

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_\infty} = 0,99 \quad (4)$$

onde

$T_s$  é a temperatura da superfície (K);

$T_\infty$  é a temperatura do fluido (K);

$T$  é a temperatura da camada limite térmica (K).

Assim, tipicamente, a espessura da camada limite térmica  $\delta_t$ , é considerada como sendo aquela que possui temperatura  $T$  e que satisfaz a relação apresentada na equação (4).

A relação entre o coeficiente de transferência de calor por convecção e as condições da camada limite térmica podem ser demonstradas combinando a lei de Fourier para o fluido, na superfície local, ou seja, em  $y=0$ , vista na equação (5), e a lei de resfriamento de Newton, equação (6).

$$q_s = -k_f \frac{\partial T}{\partial y} \quad (5)$$

onde

$q_s$  é a taxa do fluxo de calor na superfície (W/m<sup>2</sup>);

$k_f$  é a condutividade térmica do fluido W/(mK).

A equação (5) é utilizada apropriadamente para  $y=0$ , pois na superfície não há movimentação de fluido, e a transferência de calor acontece unicamente por condução. Na equação (6) está exposta a lei de resfriamento de Newton:

$$q_s = h_c(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

onde

$h_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/(m<sup>2</sup>K)).

Combinando as equações (5) e (6), tem-se a equação (7), conforme a seguir.

$$h_c = \frac{-k_f \frac{\partial T}{\partial y}}{T_s - T_\infty} \quad (7)$$

O conhecimento do coeficiente convectivo,  $h_c$ , é importante para a determinação da taxa de calor em superfícies imersas em fluidos, contudo, sua determinação não é simples. Ao analisar o denominador da equação (7) verifica-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção é influenciado pela diferença de temperatura entre a superfície e o fluido. Analisando o numerador da equação (7) verifica-se que o coeficiente convectivo é influenciado também pelas condições da camada limite, que afetam o gradiente de temperatura. O fato da transferência de calor variar conforme o comportamento da camada limite na superfície traz como consequência a constatação da influência de diversas variáveis que afetam a camada limite, tais como densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico do fluido, geometria da superfície e das condições de escoamento (turbulento ou laminar). Sabe-se, ainda, que muitas dessas variáveis são influenciadas por outras condições, tais como pressão, temperatura e velocidade do fluido. (INCROPERA et al., 2008).

Com isso, embora o coeficiente possa ser obtido através de equações analíticas com a solução das equações da camada limite, somente em condições de escoamento mais simples tais soluções poderiam ser obtidas de imediato, por isso, relações empíricas frequentemente apresentam procedimentos mais práticos. (INCROPERA et al., 2008).

### 2.1.3 Transferência de calor por radiação

O transporte de energia térmica por condução e por convecção depende da presença de um meio material. Para que a condução ocorra, é necessária a existência de diferença de temperatura entre pontos vizinhos e, para que a convecção ocorra, deve existir um fluido livre para se movimentar e, assim, transportar energia.

Radiação é, basicamente, um mecanismo eletromagnético que permite que a energia seja transportada com a velocidade da luz através de regiões do espaço desprovidas de matéria. (BIRD et al, 2004). A taxa de transporte de energia entre dois corpos "negros" no vácuo é proporcional à diferença da quarta potência de suas temperaturas absolutas. Esse mecanismo é qualitativamente muito diferente do mecanismo de transporte de energia por condução de calor, que é proporcional ao gradiente de temperatura.

Uma compreensão profunda da física do transporte de energia por radiação requer o uso de diversas disciplinas diferentes, tal como a teoria eletromagnética, que é necessária para a descrição da natureza da radiação, a termodinâmica, que é necessária para a determinação de algumas relações entre as propriedades globais de um recipiente contendo radiação, a mecânica quântica, que é necessária para a descrição em detalhes dos processos atômicos e moleculares que ocorrem quando a radiação é produzida dentro da matéria e quando é absorvida pela matéria, e a mecânica estatística, que é necessária para a descrição do modo de distribuição da radiação pelo espectro de comprimentos de onda. (BIRD et al, 2004).

Na sequência serão expostos os conceitos principais e serão apresentados os resultados da teoria e de experimentos. Assim, será apresentado como alguns desses resultados podem ser usados para o cálculo da taxa de transferência de calor por processos de radiação em sistemas simples.

Quando um corpo sólido é aquecido, sua superfície emite radiação com comprimento de onda na faixa de 0,1 a 100  $\mu\text{m}$ . Usualmente, refere-se a esta radiação como radiação térmica.

Quando energia é fornecida a um corpo sólido, algumas de suas moléculas e átomos são elevados a "estados excitados". Existe a tendência para que estes átomos ou moléculas retomem espontaneamente para estados com energia mais baixa. Quando isso ocorre, energia é emitida sob a forma de radiação eletromagnética. Portanto, os estados de matéria emitem radiação. (INCROPERA et al., 2008).

Os diversos tipos de radiação se distinguem apenas pela faixa de comprimento de onda. No vácuo, todas estas formas de energia radiante se propagam no vácuo com a velocidade da luz,  $c$ .

O comprimento de onda  $\lambda$ , que caracteriza a onda eletromagnética, é relacionado à sua frequência,  $\nu$ , pela equação (8).

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (8)$$

onde

$\lambda$  é o comprimento de onda (m);

$c$  é a velocidade da luz (m/s);

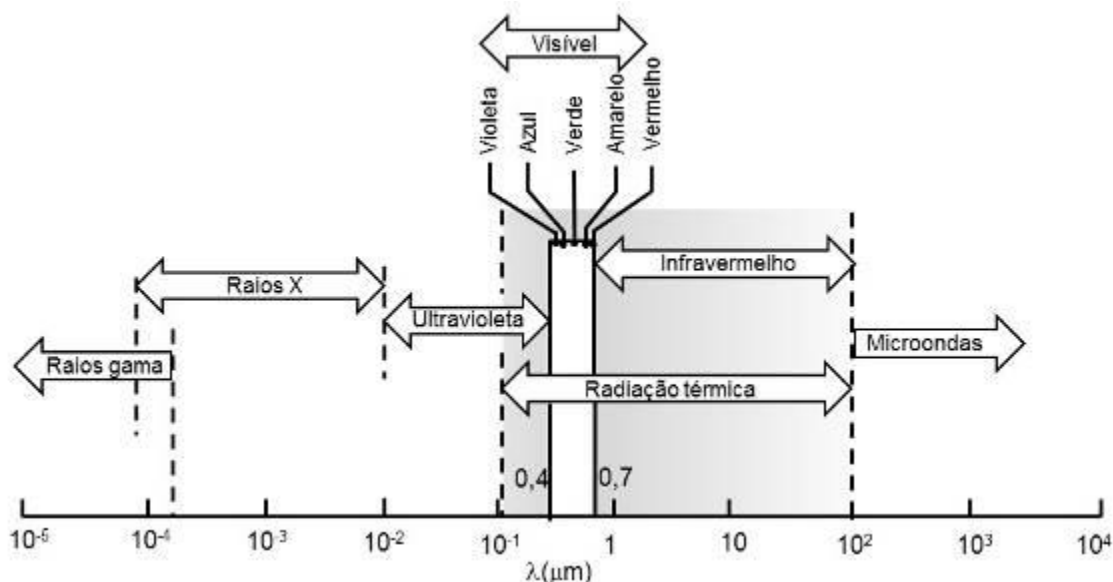
$\nu$  é a frequência (1/s).

Devido ao fato de a radiação resultar de alterações nos estados eletrônicos, vibracionais e rotacionais dos átomos ou moléculas, a radiação se distribuirá por uma faixa de comprimentos de onda. Na verdade, a radiação térmica representa apenas uma pequena parte de espectro completo da radiação eletromagnética. A Figura 2.3 ilustra o espectro da radiação térmica em função do comprimento de onda.

Para descrever o fenômeno da radiação é útil e necessário utilizar o conceito de corpo negro. Um corpo negro é um objeto hipotético que absorve toda a radiação incidente, independente de seu comprimento de onda e de sua direção e, da mesma

forma, emite toda a radiação absorvida. Assim, como absorvedor e emissor perfeito, o corpo negro serve como um padrão no qual as propriedades radiantes de superfícies podem ser comparadas. É importante ressaltar que nenhuma superfície real possui as características ideais de um corpo negro. (INCROPERA et al., 2008).

FIGURA 2.3 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO TÉRMICA



FONTE: Adaptada de INCROPERA et al., 2008.

Max Planck desenvolveu uma equação que relacionou o fluxo de energia radiante do corpo negro (poder emissivo) com a temperatura e o comprimento de onda, conhecida como a lei da distribuição de Planck. (BIRD et al, 2004). Através dos resultados obtidos, foi possível constatar algumas características importantes, conforme a seguir. (INCROPERA et al., 2008).

- A radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda;
- Em qualquer comprimento de onda, a magnitude da radiação emitida aumenta com o aumento da temperatura.

Na Figura 2.5 está ilustrado, para algumas temperaturas, o comportamento do poder emissivo de um corpo negro em relação ao comprimento de onda, obtido através do equacionamento de Planck. É possível verificar também que o sol, que pode ser aproximado como um corpo negro na temperatura de 5800 K, possui sua máxima emissividade na região do espectro visível pelo ser humano.

Ao integrar a equação da distribuição espectral de Plank, para todos os comprimentos de onda, obtém-se um resultado simples, porém, importante, conhecida como lei de Stefan-Boltzmann, que pode ser visualizada na equação (9). (INCROPERA et al., 2008).

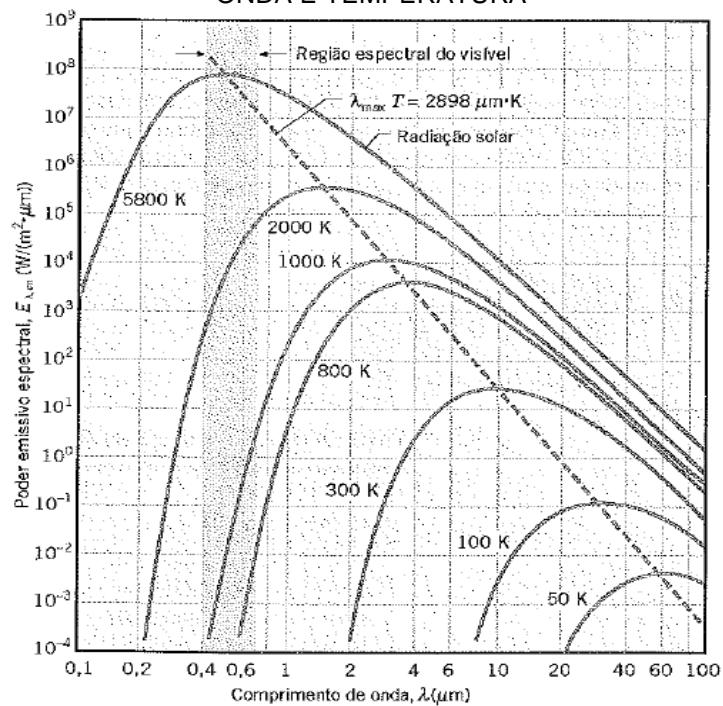
$$q_{cn} = \sigma T^4 \quad (9)$$

onde

$q_{cn}$  é o fluxo de energia total (radiação) emitida pela superfície do corpo negro ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ .

FIGURA 2.4 - PODER EMISSIVO DO CORPO NEGRO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA E TEMPERATURA



FONTE: INCROPERA et al.(2008).

Outro conceito importante é a absortividade. A radiação que atinge a superfície de um sólido opaco é absorvida ou refletida. A fração da energia incidente que é absorvida, descrita na equação (10), é denominada absortividade.

$$\alpha = \frac{q_a}{q_i} \quad (10)$$

onde

$\alpha$  é a absorptividade (adimensional);

$q_\alpha$  é a radiação absorvida (W/m<sup>2</sup>);

$q_i$  é a radiação incidente (W/m<sup>2</sup>).

Há também a emissividade. Como visto, toda a matéria emite radiação, assim, a emissividade de uma superfície de um sólido opaco é dada pela equação (11).

$$\varepsilon = \frac{q_r}{q_{cn}} \quad (11)$$

Onde

$\varepsilon$  é a emissividade (adimensional);

$q_r$  é a radiação emitida pela superfície (W/m<sup>2</sup>).

Substituindo a equação (11) na equação (9), tem-se a equação (12).

$$q_r = \varepsilon \sigma T^4 \quad (12)$$

É importante ressaltar que tanto a absorptividade quanto a emissividade possuem valores menores que 1 e, segundo a equação da distribuição de Planck, podem variar com a frequência da radiação e com a temperatura do corpo.

Ainda, o fluxo de energia por radiação em uma superfície pode ser escrito na forma diferencial conforme a equação (13):

$$dq_r = h_r dT \quad (13)$$

onde

$h_r$  é o coeficiente de transferência de calor por radiação emitida W/(m<sup>2</sup>K).

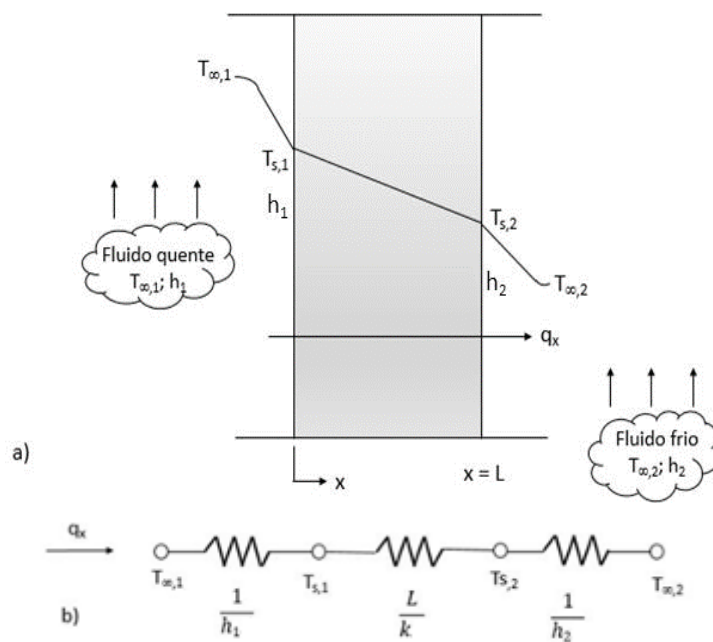
Manipulando a equação (13) percebe-se que o coeficiente de transferência de calor por radiação é igual à derivada do fluxo  $q_r$  em relação à temperatura  $T$ . Assim, derivando a equação (12), tem-se a equação (14):

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T^3 \quad (14)$$

## 2.2 RESISTÊNCIA TÉRMICA

Para o fluxo de calor unidimensional sabe-se que existe uma analogia entre a difusão de calor e de carga elétrica, assim, uma resistência elétrica é análoga a uma resistência térmica. (INCROPERA et al., 2008). Na Figura 2.6 é ilustrada a analogia entre os dois sistemas físicos, térmico e elétrico.

FIGURA 2.5 - FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DE UMA PAREDE PLANA. (A) SISTEMA TÉRMICO. (B) SISTEMA ELÉTRICO



FONTE: Adaptada de INCROPERA et al. (2008).

Para obter a resistência total da parede, para o exemplo da Figura 2.6, basta somar todas as resistências em série pois, na teoria de circuitos, o fluxo de calor  $q$  que atravessa cada uma das resistências é o mesmo. Assim, tem-se a equação (15).

$$R_t = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_2} \quad (15)$$



onde

$R_t$  é a resistência térmica total da superfície 1 até a superfície 2 K/(m<sup>2</sup>W).

$h_1$  e  $h_2$  são os coeficientes de transferência de calor equivalentes das superfícies K/(m<sup>2</sup>W).

Percebe-se ao analisar a Figura 2.6 que a resistência térmica é representada nas superfícies (mecanismos de troca de calor por convecção), e no interior do sólido (mecanismos de troca de calor por condução), essa representação pode ser usada como um exemplo de troca de calor que ocorre em uma parede. Portanto é importante entender a equação (15) com maior profundidade e, para isso, é necessário entender os conceitos dos tipos de resistências térmicas.

A resistência térmica superficial por convecção, é o inverso do coeficiente de transmissão de calor por convecção, e é dada pela equação (16). (INCROPERA et al., 2008).

$$R_{cv} = \frac{1}{h_c} \quad (16)$$

onde

$R_{cv}$  é a resistência térmica superficial por convecção (m<sup>2</sup>K)/W.

Analogamente, a resistência térmica por condução imposta à taxa de fluxo de calor  $q$ , por área, no interior da parede, é o inverso da condutividade térmica e depende da espessura da parede, conforme dada na equação (17). (INCROPERA et al., 2008).

$$R_p = \frac{L}{k} \quad (17)$$

onde

$R_p$  é a resistência térmica no interior da parede (m<sup>2</sup>K)/W;

$L$  é a espessura da parede (m).

Da mesma forma, o conceito de resistência de transferência térmica por radiação, é descrita conforme a equação (18):

$$R_r = \frac{1}{h_r} \quad (18)$$

onde

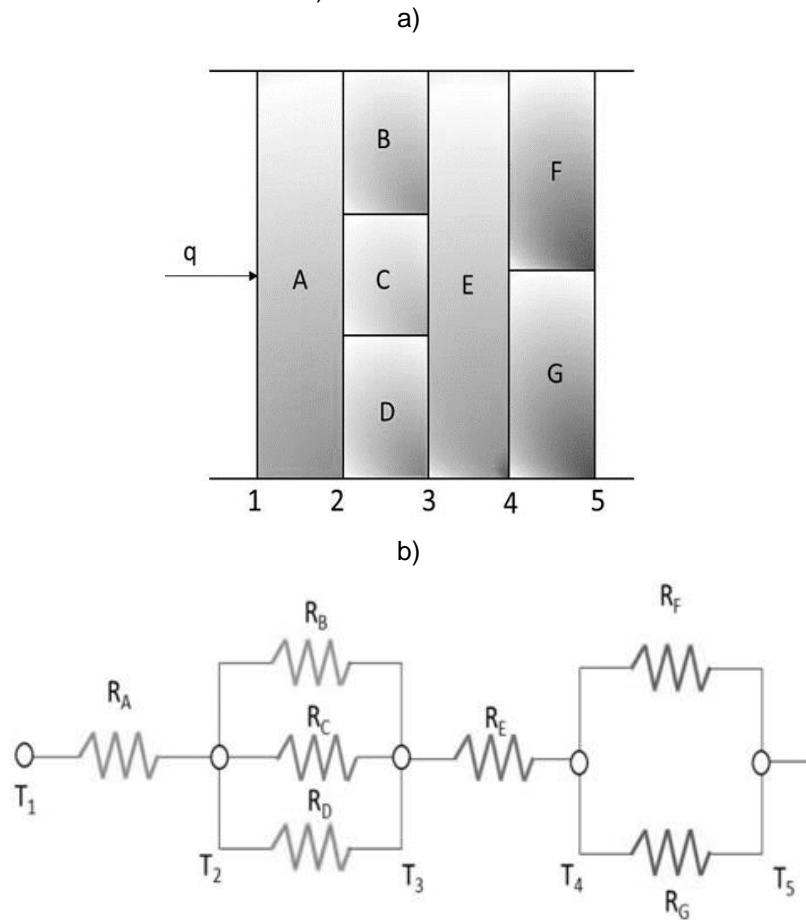
$R_r$  é a resistência de transferência térmica por radiação (m<sup>2</sup>K)/W.

Para o caso de uma parede, pode-se considerar que o fluxo de calor total (ou energia térmica total), que sai da superfície, se divide em fluxo de calor por efeito convectivo e fluxo por radiação, assim, considera-se que as resistências térmicas desses dois fenômenos estão em paralelo, por isso, a seguir será descrita como essa modelagem ocorre.

A analogia elétrica possui bastante utilidade quando se deseja obter a temperatura em sistemas compostos por mais de um tipo de material podendo possuir dimensões diferentes, o que resulta em resistências térmicas diferentes. Para resolver esse problema, um circuito elétrico equivalente pode facilitar a análise, através do conceito de resistências em série e paralelo. A Figura 2.7 ilustra um problema típico e o seu circuito análogo para transferência de calor através de uma parede composta. (HOLMAN, 1981).

O conceito básico para identificar se um circuito está em série ou paralelo é identificar se o fluxo de calor total está se dividindo entre os elementos ou não. Caso o fluxo total esteja se dividindo, caracteriza elementos em paralelo, se o fluxo total é o mesmo, caracteriza elementos em série. Na Figura 2.7 verifica-se que o fluxo  $q$  que atravessa o elemento A é o mesmo que atravessa o elemento E, por isso estão em série. Contudo, o fluxo  $q$  se divide entre os elementos B, C e D, logo os mesmos estão em paralelo.

FIGURA 2.6 - A) TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SÉRIE E EM PARALELO ATRAVÉS DE UMA PAREDE COMPOSTA. B) CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE.



FONTE: Adaptada de HOLMAN, 1981.

Portanto, como descrito anteriormente, a resistência térmica por convecção e a resistência térmica por radiação estão em paralelo, pois o fluxo na superfície se divide em fluxo convectivo e fluxo por radiação. A resistência térmica equivalente de  $n$  resistências em paralelo é dada pela equação (19). (Incropera, et al., 2008):

$$\frac{1}{R_{par}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots \frac{1}{R_n} \quad (19)$$

onde

$R_{par}$  é a resistência equivalente de  $n$  elementos em paralelo ( $m^2K/W$ ).

Assim, a resistência térmica superficial, que representa o fenômeno convectivo e o fenômeno da radiação, obtida através da aplicação das equações (16) e (18) na equação (19), é dada pela equação (20):

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (20)$$

onde

$R_s$  é a resistência térmica superficial (m<sup>2</sup>K)/W.

Assim, reescrevendo a equação (15), que representa a resistência térmica total em uma parede, tem-se a equação (21):

$$R_t = R_{s1} + R_p + R_{s2} = \frac{1}{h_{c1} + h_{r1}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{c2} + h_{r2}} \quad (21)$$

É comum na literatura encontrar o termo transmitância térmica, que é o inverso da resistência térmica, conforme equação (22):

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (22)$$

onde

$U$  é a transmitância térmica W/(m<sup>2</sup>K).

## 2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Conforme visto, os mecanismos de transferência de energia térmica podem ocorrer através da condução, convecção e radiação. A transferência por condução ocorre em nível atômico e molecular, a transferência por convecção ocorre em nível molecular e macroscópico, através de moléculas agrupadas, caracterizando, assim, um fluido. A transferência de energia térmica por radiação, diferentes das demais, ocorre sem a necessidade de matéria como meio transmissor, contudo, é importante

ressaltar que toda matéria emite energia por radiação. Isso faz com que a transferência de calor por radiação esteja sempre presente. Portanto, quando for analisado um fenômeno de transferência de calor, como por exemplo o convectivo, que caracteriza a transferência de calor em superfícies, que é escopo do presente trabalho, deve-se analisar a transferência de calor por radiação também pois, como descrito, ela está também presente.

Uma outra consideração importante descrita nos itens anteriores é que os mecanismos de transferência de calor dependem, entre outros fatores, da temperatura, pressão e velocidade de escoamento do fluido (para o ar equivale à velocidade do vento). Este último é aplicado ao transporte convectivo.

## 2.4 VARIAÇÕES CLIMÁTICAS NO BRASIL

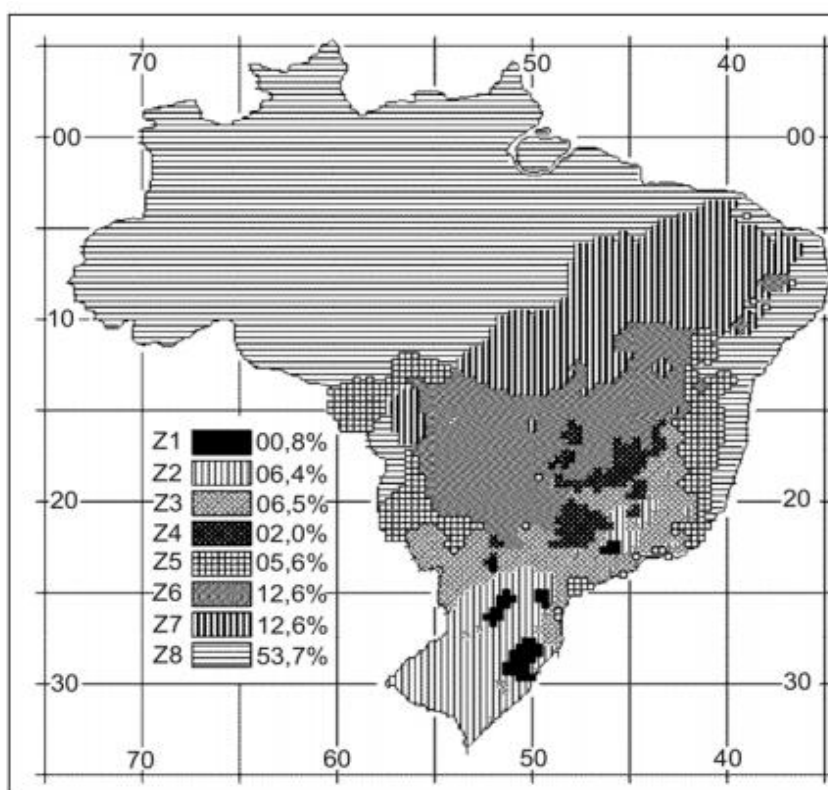
Há vários tipos de clima no Brasil devido à grande extensão do seu território, contudo, o clima predominante é o tropical. Por sua vez, a influência, principalmente, da extensão litorânea, latitude e relevo, faz com que no Brasil existem vários subtipos de climas tropicais. (SIQUEIRA et al., 2005).

A NBR 15220-3:2005 *“Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social”* apresenta a divisão do território nacional em zonas bioclimáticas e, para cada uma dessas zonas, faz sugestões de estratégias construtivas de edificações, para que estas sejam otimizadas com relação ao clima. O procedimento para classificação das zonas bioclimáticas foi realizado a partir da Carta Bioclimática de Givoni, adaptada ao Brasil e descrita no anexo B da própria NBR 15220-3 (ABNT 2005).

No anexo A da norma NBR 15220-3 (ABNT 2005) são apresentadas 330 cidades com suas respectivas zonas bioclimáticas. Conforme descrito, para cada uma das oito zonas são apresentadas algumas diretrizes construtivas para as edificações, tais como o tipo de estratégia a ser empregada para o condicionamento térmico passivo, lembrando que a norma é voltada para habitações unifamiliares de interesse social. Por exemplo, para a zona 1, é sugerido o aquecimento solar ou vedações internas pesadas (inércia térmica).

Outra norma que contém considerações sobre as zonas bioclimáticas é a ABNT NBR 15575-1 “*Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*” de 2013. O foco desta Norma está nas exigências dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos. A norma estabelece requisitos para que as habitações atendam critérios de segurança, habitabilidade e sustentabilidade conforme mostra a Figura 2.7.

FIGURA 2.7 - ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO



FONTE: NBR 15220-3, (ABNT 2005)

Dentro do critério habitabilidade encontra-se o desempenho térmico. Com isso, no item 11.1 da norma NBR 15575-1 (ABNT 2013), são sugeridos dois procedimentos para o critério da avaliação da adequação do desempenho térmico.

O primeiro procedimento consiste em fazer uma avaliação da transmitância térmica (que é o inverso da resistência térmica) e também da capacidade térmica, das paredes e coberturas. Os critérios para aceitação dessas grandezas estão descritos na parte 4 e 5 da NBR 15575 (ABNT 2013). Na norma é afirmado que este método é considerado simplificado para efeito de análise, contudo, não são descritos os procedimentos para os cálculos da transmitância e da capacidade térmicas e é

sugerido que estes sejam realizados conforme a norma NBR 15220-2 “Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações” de 2005. O procedimento descrito nesta norma será detalhado no capítulo 3 do presente trabalho.

Caso os critérios para aceitação dessas grandezas, descritos na parte 4 e 5 da NBR 15575 (ABNT 2013), não sejam atendidos, como trata-se de um método simplificado, é sugerido na norma que sejam realizadas simulações computacionais, por isso, são apresentados no anexo A da NBR 15575 (ABNT 2013) dados de dias típicos de inverno e de verão de algumas cidades brasileiras. Na Tabela 2.1 a seguir são mostrados alguns exemplos desses dados de cidades, juntamente com as suas respectivas zonas bioclimáticas.

TABELA 2.1 - DADOS DE DIAS TÍPICOS DE INVERNO E VERÃO DE ALGUMAS CIDADES BRASILEIRAS E SUAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS

| Zona Bioclimática | Cidades      | Temperatura máxima dias típicos de verão °C | Temperatura mínima dias típicos de inverno °C | Amplitude de Temperatura dias típicos de verão °C | Amplitude de Temperatura dias típicos de inverno °C |
|-------------------|--------------|---|---|---|---|
| 1                 | Curitiba     | 31,4  | 0,7   | 10,2  | 11,6  |
| 3                 | Porto Alegre | 35,9  | 4,3   | 9,6   | 8,6   |
| 4                 | Brasília     | 31,2  | 10,0  | 12,5  | 12,2  |
| 6                 | Campo Grande | 33,6  | 13,7  | 10,0  | 11,5  |
| 7                 | Teresina     | 37,9  | 18,0  | 13,2  | 12,6  |
| 8                 | Fortaleza    | 32,0  | 21,5  | 6,5   | 7,0   |

FONTE: Adaptado da NBR 15575-1, (2013).

O segundo procedimento para a avaliação de desempenho térmico, segundo a norma NBR 15575 (ABNT 2013) é a medição, que consiste basicamente na verificação do atendimento aos requisitos e critérios estabelecidos nesta norma, por meio da realização de medições em edificações ou protótipos construídos. Obviamente esse procedimento possui a desvantagem da necessidade de construção, ou seja, não é aplicável na fase de projetos.

#### 2.4.1 Considerações sobre as variações climáticas no Brasil

Como visto, o Brasil possui oito regiões classificadas segundo suas características climáticas, denominadas zonas bioclimáticas. Essa variação tem impacto direto nas diretrizes construtivas das edificações em diversos aspectos. Dentro do desempenho térmico, por exemplo, uma edificação situada em Curitiba, com temperatura média mínima no inverno de 0,7 °C deveria possuir características diferentes daquelas edificações situadas em Fortaleza, onde a temperatura média mínima no inverno é de 21,5 °C. Caso essas edificações não sejam diferentes, é possível que não haja eficiência energética no projeto térmico ou não haja conforto térmico.

Com isso, está evidenciado nas normas citadas que o Brasil possui variação considerável com relação às características climáticas. As normas orientam os projetistas a considerarem essa variação em seus projetos, através do fornecimento de subsídios, tais como dados climáticos e diretrizes construtivas. Contudo, para o desempenho térmico de edificações, uma grandeza importante é a resistência térmica, a qual engloba o coeficiente térmico superficial, escopo do presente trabalho, e é resultado dos mecanismos de troca de calor da edificação. Nas normas citadas essa grandeza é tratada como um dado de entrada nos critérios de aceitação do desempenho térmico, porém, ela tem impacto também no cálculo de demanda de energia para condicionamento térmico artificial, ou seja, mesmo atendendo aos critérios de aprovação, um valor mais apurado poderia resultar num projeto ainda mais eficiente, assim, métodos de cálculo precisos dessa grandeza podem ser importantes.

Com isso, no capítulo 3, serão descritos diversos métodos disponíveis na literatura para o cálculo da resistência térmica superficial, incluindo aquela sugerida na norma NBR 15220-2 (ABNT 2005), citada anteriormente.

## 2.5 ESTADO DA ARTE

A seguir será descrito o estado da arte no tema do presente trabalho, organizado em ordem cronológica.



Siqueira (2005) em seu trabalho afirma que, em alguns métodos de avaliação do desempenho térmico, os dados climáticos são caracterizados pelos dias típicos de projeto, para os períodos de inverno e verão. Esses dias são determinados em função de sua frequência de ocorrência e representam níveis de exigência na avaliação. Nesse trabalho, foi apresentado um método para se estimarem os dias típicos de projeto, por meio do tratamento estatístico dos dados climáticos.

Fohanno & Polidori (2006) em seu trabalho desenvolveram uma modelagem da transferência de calor por convecção em superfícies internas verticais. Foi proposta uma forma de cálculo do coeficiente convectivo médio em função das dimensões da parede e de sua densidade de fluxo térmico. Seus resultados se mostraram próximos daqueles obtidos por outros autores citados em seu trabalho. Já Emmel et al. (2007) desenvolveram estudos para o coeficiente convectivo externo. É afirmado que dependendo do método utilizado para a determinação dos coeficientes convectivos externos, o cálculo da demanda de energia pode variar de 20,0% a 40,0%. Foi verificado durante o desenvolvimento do seu trabalho que, para o efeito convectivo, a velocidade do vento possui grande influência, assim como o ângulo de incidência. Concluíram que, para ventos superiores a 2,0 m/s, os efeitos da diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente pode ser desprezada, com relação ao efeito do vento, na transferência de calor.

Blocken et al. (2009) realizaram simulações 3D em alta resolução em um cubo de 10,0 m de aresta para determinar o coeficiente convectivo de calor. A validação dos resultados foi realizada em túnel de vento para modelos de cubos em escala reduzida. Concluiu através da análise dos seus resultados que a variação do coeficiente convectivo é fortemente dependente da variação da velocidade do vento, contudo, para o ângulo, variações entre  $0,0^\circ$  e  $67,5^\circ$  não afetam significativamente os resultados.

Em um modelo em escala real, Shao et al. (2009) desenvolveram um método para a medição do coeficiente convectivo em telhados. O novo método foi nomeado de *Naphthalene Sublimation Method*. Os resultados desse método foram comparados com aqueles obtidos através do balanço de fluxo de calor. O novo método resultou em valores maiores daqueles obtidos por balanço do fluxo.

Concluíram que a diferença de temperatura não tem grande influência sobre os resultados.

Peeters et al. (2011) realizaram uma revisão sobre os coeficientes convectivos internos. Foram consideradas convecção natural e forçada. Verificou-se uma grande variação nos resultados de diferentes métodos e concluiu-se que deve-se ter cuidado ao aplicar os métodos, pois foram desenvolvidos em condições específicas e que talvez não representem bem outras condições. Verificou-se que, entre as várias perturbações de fluxo de ar, o uso intermitente de ventiladores possui maior influência do que aqueles causados por movimentação de pessoas ou abertura e fechamento de portas.

A variação dos resultados obtidos por simulação, para a demanda energética de edificações, quando são inseridos diferentes valores de coeficientes convectivos e de temperatura externa, foi realizada por Harkouss (2013). Foram utilizados diversos métodos para o cálculo do coeficiente convectivo externo e uma das conclusões do trabalho é que o coeficiente de transferência de calor da convecção externa afeta os consumos de energia mais do que a temperatura externa. Foram realizadas simulações para apartamentos isolados termicamente e para apartamentos não isolados. Concluiu que no inverno há maior consumo de energia do que no verão e que a isolação afeta consideravelmente os resultados.

Mirsadeghi et al. (2013) realizaram uma revisão sobre os coeficientes convectivos externos usados nos softwares de simulação térmica, com o objetivo de levantar algumas incertezas envolvidas. Concluíram que diferentes métodos para cálculo do coeficiente convectivo externo podem resultar em desvios de 30% acima ou abaixo da média obtida, para os valores de demanda de energia para refrigeração. Concluíram que cada método de cálculo dos coeficientes externos possui um range de aplicação e que há muitas incertezas nos modelos propostos, principalmente para cálculo de demanda energética para refrigeração.

Obyn & Moeske (2015) analisaram os métodos para cálculo de coeficientes convectivos internos aplicados em prédios de escritórios e como eles podem variar ao longo do tempo, devido à variação da diferença de temperatura entre a superfície e meio ambiente. Concluíram que há uma grande variação entre os valores dos

coeficientes obtidos e a média anual desses valores, contudo, o uso de valores constantes, para o ano inteiro, não acarreta em grandes desvios.

Ohlsson et al. (2016) fizeram uma análise de dois métodos para a medição dos coeficientes externos em fachadas e telhados, *Loveday* e *Ito*. Concluíram que para convecção forçada, os dois métodos apresentaram incertezas de 4%. Contudo, na condição de convecção natural, o método *Ito* não pode ser usado.

Percebe-se através do estado da arte que há muita variação em relação aos resultados obtidos para os diversos métodos de cálculo dos coeficientes convectivos. Essa variação causa uma considerável diferença nos resultados de cálculo de demanda de energia. No Brasil há um método proposto em norma, e que é amplamente utilizado. Assim, seria importante ter-se o conhecimento de qual é a variação do método utilizado no Brasil quando comparado com os demais, para que fosse possível ter-se maior sensibilidade dos efeitos desses coeficientes no conforto térmico de edificações.

Para enriquecer o estado da arte, no Brasil existem diversos trabalhos realizados em universidades, relativas ao tema conforto térmico, que serão descritos a seguir.

Meier et al.(2002) afirmam que uma edificação é considerada eficiente termicamente quando o consumo desta é mínimo, mas o ambiente é ainda confortável para os usuários. A eficiência energética de uma edificação irá depender das trocas térmicas entre a edificação e o ambiente externo. No trabalho realizado propuseram três critérios para avaliar edificações: equipamentos e materiais eficientes que estejam de acordo com o local e condições do ambiente, conforto aos usuários e consumo menor de energia quando comparado a uma outra semelhante.

Boni (2003), em sua dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, em Ijuí, Rio Grande do Sul, avaliou um modelo matemático de transferência de calor não estacionário solo-ar.

Vilela (2004), no Programa de Pós-Graduação em Energia da USP, estudou um método experimental para determinar a potencialidade do uso de energia geotérmica para fins de climatização.

Rodriguez (2005), no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS, fez um estudo numérico da transferência de calor e umidade através do solo com o sistema de climatização e Vaz (2011), no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, fez um estudo experimental e numérico da aplicação do sistema por dutos subterrâneos.

Melo (2005), na Universidade Federal de Santa Catarina, do departamento de Engenharia Civil, analisou o desempenho térmico energético de um hotel localizado na cidade de Florianópolis, através de simulações computacionais. A intenção foi de melhorar a eficiência energética do edifício, e propôs algumas alternativas de *retrofit* com base nos usos final de energia elétrica da edificação. Realizou também uma análise econômica destas alternativas.

Serafim (2010), da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, em sua dissertação, verificou e quantificou a variação na demanda e consumo de energia elétrica em uma edificação comercial. O método aplicado considerou a análise das faturas da concessionária de janeiro de 2003 até setembro de 2010. Foi constatado que após a reforma realizada em 2007 houve uma redução na demanda de 57% para o sistema de iluminação interna e 75% para o sistema de climatização.

Dombrosky (2012), da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Unisinos, em seu mestrado realizou um estudo do sistema de climatização do aeroporto Salgado Filho em Porto Alegre com o objetivo de determinar e mensurar as oportunidades de redução dos custos de operação através da operacionalização do tanque de termoacumulação existente.

### 3 MÉTODO

#### 3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A estratégia usada para a obtenção dos resultados, de forma a atingir os objetivos do presente trabalho, baseados nas hipóteses descritas, está dividida em etapas conforme descrito a seguir.

A primeira etapa, realizada no capítulo 2, consistiu na realização da revisão bibliográfica dos conceitos envolvidos no fenômeno do desempenho térmico de edificações, com foco nas resistências térmicas e, mais especificamente, nas resistências térmicas superficiais. Foi evidenciado na revisão bibliográfica que métodos empíricos para a determinação dessas resistências podem ser mais práticos do que os métodos analíticos, devido à relativa complexidade do fenômeno.

A segunda etapa da estratégia se baseia na simulação experimental. Nessa etapa foram levantados os diversos métodos para cálculo das resistências térmicas superficiais e também foram levantados os dados a serem usados nas simulações para análise mais aprofundada desses métodos. Após isso, serão realizadas simulações de demanda de energia e potência, em ferramenta computacional, denominada *Mestre*, desenvolvido para fins acadêmicos.

A terceira etapa consiste na análise dos resultados. Com os cálculos de demanda e potência realizados nas condições citadas anteriormente é possível verificar o impacto das resistências superficiais no dimensionamento de sistemas ao se considerar os diferentes métodos de cálculo de resistências térmicas superficiais.

##### 3.1.1 Unidade de análise

A unidade de análise do presente trabalho é o comportamento dos mecanismos de transferência de calor através da superfície de paredes de edificações.

##### 3.1.2 Delimitação do trabalho

O trabalho desenvolvido se limita a analisar o impacto na demanda energética e dimensionamento do sistema para o condicionamento térmico, quando são usados

diferentes métodos para o cálculo da resistência térmica superficial. Não é objetivo do presente estudo verificar a fundo qual método é melhor para as condições brasileiras. Essa avaliação poderia ser realizada após saber se há variação significativa entre eles, que é o foco do presente trabalho. Caso sim, um estudo aprofundado poderia ser feito, envolvendo ensaios e testes para verificação de aplicabilidade de cada método. Sabe-se que os métodos apresentados podem conter simplificações e que a validação de cada método pode ser feita com maior segurança através de medições na edificação real, contudo, cada edificação possui características próprias e esse procedimento não está contemplado no presente estudo.

### 3.1.3 Justificativa da escolha a partir do objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar o impacto de demanda energética no uso de diferentes métodos para o cálculo de resistências térmicas superficiais. Os testes propostos por Yin (2001) para definir a estratégia se baseiam nas seguintes perguntas:

- Trata de assunto contemporâneo? Sim
- Responde à pergunta do tipo como ou porque? Sim (isto limita a estudo de caso ou experimento)
- Requer controle sobre as variáveis? Sim (isto limita a experimento)

Logo a estratégia a ser adotada será do tipo fixo, experimental, e será utilizada a simulação e manipulação de dados climáticos para obtenção de resultados.

### 3.1.4 Testes de validade

Os testes de validade propostos por Robson (2002), possuem três principais elementos que devem ser analisados: validade de constructo, validade interna e validade externa.

*Validade de constructo:* o presente trabalho está baseado no levantamento dos diversos métodos para cálculo de resistências térmicas superficiais. Foi verificado que existem diversos métodos e que aquele utilizado no Brasil, NBR 15220-2 (ABNT 2005), apresenta valores constantes, sendo que na NBR não está descrito o método utilizado para obtenção desses valores.

Com isso, a abordagem a ser realizada consiste em avaliar o impacto no dimensionamento de sistemas mecânicos para o condicionamento térmico quando são utilizados outros métodos. Serão calculados diversos valores de coeficientes convectivos internos e externos, que serão obtidos através dos diversos métodos disponíveis. Estes valores serão inseridos nos cálculos de demanda e potência de energia térmica necessários para manter o conforto térmico de um ambiente. Com isso será possível verificar o impacto dos diferentes métodos de cálculo de coeficientes convectivos na demanda de energia e potência.

*Validade interna:* devido ao fato do problema de pesquisa ser baseado em dados quantitativos, os quais são consequência de diversas equações matemáticas, nas quais são inseridos valores de condições climáticas, a relação causal será atendida.

*Validade externa:* os resultados do presente trabalho poderão ser aplicados diretamente por engenheiros, arquitetos e pesquisadores no desenvolvimento de projetos mais eficientes de desempenho térmico, e também poderá ter relevância em outros estudos que envolvam fenômenos térmicos. É possível, também, obter resultados diferentes para cada região do país, o que tornaria possível dividir o método empregado no Brasil, por região, aprimorando a norma utilizada no Brasil para dimensionamento de sistemas de condicionamento térmico.

### 3.2 COLETA DE DADOS

Para o desenvolvimento do estudo, a coleta de dados seguiu o procedimento descrito em ordem cronológica:

- Levantamento dos métodos disponíveis na literatura para cálculo das resistências térmicas superficiais em edificações;
- Levantamento de locais com variação climática a serem consideradas nas simulações;

- Levantamento de dados climáticos dos locais a serem utilizados para simulação e realização de cálculos.

No capítulo a seguir é demonstrado o detalhamento de cada procedimento descrito.



## 4 ANÁLISE DO IMPACTO DOS DIFERENTES MÉTODOS PARA CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS SUPERFICIAIS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, primeiramente, conforme descrito anteriormente, foram levantados diversos métodos disponíveis na literatura para cálculo das resistências térmicas superficiais em edificações. Depois disso, foram definidos os locais para cálculo e análise dos resultados bem como os dados ambientais utilizados nas simulações.

### 4.1 MÉTODOS PARA CÁLCULO DOS COEFICIENTES CONVECTIVOS SUPERFICIAIS

Alguns autores tratam do fenômeno térmico convectivo se referindo aos coeficientes convectivos, e outros autores se referem às resistências térmicas superficiais. Como visto, as resistências térmicas superficiais são o inverso dos coeficientes convectivos de transferência de calor. Existem várias formas de se determinar esses coeficientes, tais como métodos analíticos, que são aplicáveis para geometrias simples, métodos numéricos, estudos experimentais aplicados em modelos em escala reduzida, e ensaios em escala real. Para que os modelos forneçam resultados confiáveis, para isso, é importante que os materiais, processos internos, ambiente externo, interações, e condições de operação sejam considerados simultaneamente. A seguir, são apresentados alguns métodos utilizados para a obtenção dos valores dos coeficientes convectivos.

#### 4.1.1 Método da ABNT NBR 15220-2 (ABNT 2005)

No Brasil a norma brasileira ABNT NBR 15220-2 *“Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações”* de 2005 fornece orientações de como realizar o cálculo das resistências térmicas totais das paredes. O método sugere a equação (23), transcrita abaixo:

$$R_t = R_{se} + R_p + R_{si} \quad (23)$$

onde

$R_t$  é a resistência térmica total, de superfície a superfície ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );

$R_{se}$  é a resistência térmica superficial externa ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );







$R_p$  é a resistência térmica do material da parede ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );

$R_{si}$  é a resistência térmica superficial interna ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ).

A equação (23) decorre da teoria apresentada na equação (21) da revisão bibliográfica.

Para as resistências superficiais, a norma sugere, em forma de tabela, valores de resistências internas e externas. A tabela da norma está transcrita na Tabela 4.1 a seguir.

TABELA 4.1 - RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL INTERNA E EXTERNA SUGERIDAS PELA NBR 15220-2 (ABNT 2005)

| $R_{si}$ ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )  |   |   | $R_{se}$ ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )  |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
| Direção do fluxo de calor   |   |   | Direção do fluxo de calor   |   |   |
| Horizontal  | Ascendente  | Descendente   | Horizontal  | Ascendente  | Descendente   |
|  |  |  |  |  |  |
| 0,13  | 0,10  | 0,17  | 0,04  | 0,04  | 0,04  |

FONTE: NBR 15220-2 (ABNT 2005).

Embora na norma haja a orientação de que a resistência térmica superficial possa variar de acordo com diversos fatores, tais como emissividade, velocidade do ar sobre a superfície e temperatura, é importante observar que os valores apresentados na Tabela 4.1 são constantes, e normalmente são utilizados pela maioria dos projetistas, independente da região do Brasil.

Na NBR 15220-2 (ABNT 2005) não está descrito o método de cálculo que resultou nos valores da Tabela 4.1. Para que seja possível uma análise mais aprofundada, contudo, após pesquisa bibliográfica verificou-se que o método utilizado está descrito na norma ISO 6946:2007 “Building components and building elements —

Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation method”, o qual será apresentado a seguir.

#### 4.1.2 Método da ISO 6946:2007

Na ISO 6946:2007 é apresentada a mesma tabela constante na NBR 15220-2 (ABNT 2005) e que está transcrita na Tabela 4.1 do presente trabalho. Contudo, há uma orientação na ISO 6946:2007 para que essa tabela seja usada apenas quando não houver dados disponíveis, e que é possível usar o método que gerou esses valores, para refazer os cálculos, quando houver diferentes condições de contorno, para isso, a ISO 6946:2007 apresenta o método utilizada, no seu anexo A, e que será descrita a seguir.

A resistência superficial, na norma ISO 6946:2007, é dada pela equação (24).

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (24)$$

Percebe-se que equação (24) é a mesma que foi deduzida e apresentada na equação (20) da revisão bibliográfica que trata dos mecanismos de troca de calor. Na equação (24),  $R_s$  representa a resistência térmica superficial, sem distinguir se a superfície é interna ou externa. Assim, o cálculo da resistência superficial interna ou externa vai depender do valor de  $h_c$ , ou seja, para o cálculo da resistência superficial externa e interna considera-se a equação (24) reescrita conforme as equações (25) e (26):

$$R_{se} = \frac{1}{h_{c,ext} + h_{r,ext}} \quad (25)$$

$$R_{si} = \frac{1}{h_{c,int} + h_{r,int}} \quad (26)$$

É levado em consideração o fenômeno da radiação, tanto para a resistência superficial interna quanto externa, considerando, contudo, que as temperaturas são diferentes nelas.

Na ISO 6946:2007 são apresentadas as seguintes equações para o coeficiente de transferência de calor por radiação,  $h_r$ , descritas nas equações (27) e (28):

$$h_r = \varepsilon h_{r0} \quad (27)$$

onde

$h_{r0}$  é o coeficiente de transferência de calor por radiação calor do corpo negro.

$$h_{r0} = 4\sigma T_m^3 \quad (28)$$

onde

$T_m$  é a temperatura média da parede e seus arredores (K).




Substituindo a equação (28) na equação (27) tem-se a equação (29):

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T_m^3 \quad (29)$$

Verifica-se que a equação (29) é a mesma que foi deduzida e apresentada na equação (14) da revisão bibliográfica que trata dos mecanismos de troca de calor por radiação.

Para os coeficientes convectivos internos, os valores de  $h_{c,int}$ , na ISO 6946:2007 são fornecidos para 3 condições, conforme Tabela 4.2:

TABELA 4.2 - COEFICIENTE DE TROCA DE CALOR POR CONVECÇÃO INTERNO

| Coeficiente de troca de calor por convecção interno $h_{c,int}$ [W/(m²K)]           |   |   |
|---|---|---|
| Direção do fluxo de calor   |   |   |
| Ascendente  | Horizontal  | Descendente   |
|  |  |  |
| 5,0   | 2,5   | 0,7   |

FONTE: Adaptado ISO 6946:2007

Para os coeficientes convectivos externos, o valor de  $h_{c,ext}$ , é dado na norma em função da velocidade do vento  $V$  pela Equação 30.

$$h_{c,ext} = 4 + 4V \quad (30)$$

Os dados de entrada utilizados nas Equações 25, 26, 29 e 30 pela ISO 6946:2007 são: emissividade, temperatura e velocidade do vento. Os valores dessas grandezas, utilizados pela norma, para obtenção dos dados apresentados na Tabela 4.1, replicados na norma brasileira NBR 15220-2 ABNT 2005 estão contidos na Tabela 4.3 a seguir.

TABELA 4.3 - VALORES DE EMISSIVIDADE, TEMPERATURA E VELOCIDADE DO VENTO UTILIZADOS PELA ISO 6946:2007.

| Rsi (m²K/W)           |             | Rse (m²K/W)           |             |                     |
|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|---------------------|
| Emissividade          | Temperatura | Emissividade          | Temperatura | Velocidade do vento |
| $\varepsilon$ (adim.) | T (°C)      | $\varepsilon$ (adim.) | T (°C)      | V (m/s)             |
| 0,9                   | 20,0        | 0,9                   | 10,0        | 4,0                 |

Fonte: Adaptado ISO 6946:2007.

Na Tabela 4.3, verifica-se que a temperatura externa utilizada foi de 10 °C, típica de locais com clima frio. As parcelas da radiação consideradas para as superfícies interna e externa foram calculadas considerando as temperaturas do ambiente interno e externo, 20 °C e 10 °C, respectivamente.

#### 4.1.3 Métodos desenvolvidos empiricamente

Pode-se considerar que, para a superfície de uma parede, os fenômenos convectivos que ocorrem no interior de uma edificação possuem características diferentes daqueles que ocorrem no exterior, devido, principalmente, ao comportamento do escoamento nessas superfícies. Assim, diversos estudos experimentais foram realizados para a determinação do coeficiente de transferência de calor convectivo discriminando o lado externo e o lado interno. Na Tabela 4.4 são apresentadas algumas equações obtidas através de experimentos, para a determinação do coeficiente convectivo externo. Os modelos usados nesses experimentos podem ser divididos em duas categorias: aqueles feitos em modelos em escala reduzida, e aqueles em escala real. (MIRSADEGHI et al., 2013).

TABELA 4.4 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO

| Modelos em escala reduzida  | Descrição  | Equações   |
|-----------------------------|--|--|
| McAdams (1954)              | Medições em túnel de vento (aplicações para superfície lisa ou rugosa)   | $h_{c,ext} = 5,678 \left[ m + n \left( \frac{V_f}{0,3048} \right)^p \right]$ |
| CIBS (1979)                 | Medições em túnel de vento   | $h_{c,ext} = 4,1V_{loc} + 5,8$   |
| Jayamaha (1996)             | Medições em campo  | $h_{c,ext} = 1,444V + 4,955$   |
| Modelos completos           | Descrição  | Equações   |
| Sturrock (1971)             | Superfície exposta   | $h_{c,ext} = 6,1V_r + 11,4$  |
|                             | Superfície normal  | $h_{c,ext} = 6V_r + 5,7$   |
| Nicol (1977)                | Medições noturnas para uma janela externa, nas regiões árticas no Canadá   | $h_{c,ext} = 7,55V_r + 4,35$   |
| Hagishima & Tanimoto (2003) | Medições em um edifício composto por 2 andares (9,9 m), anexado e protegido por um de 4 andares - Superfícies horizontais  | $h_{c,ext} = 2,28V_r + 8,18$   |
|                             | Medições em um edifício composto por 2 andares (9,9 m), anexado e protegido por um de 4 andares - Superfícies verticais  | $h_{c,ext} = 10,21V_{loc} + 4,47$  |
| Loveday mixe                | Sem referências da publicação original, é aplicado sem considerar tipo de construção, textura da superfície, orientação, e tipos de terreno.   | $h_{c,ext} = 16,7V_{loc}^{0,5}$  |
| ISO 6946: (2007)            | Nenhuma informação pode ser encontrada sobre o experimental - Este modelo não leva em conta as variações no tipo de construção, a superfície, orientação de superfície, condições de acolhimento e do tipo de terreno. | $h_{c,ext} = 4V + 4$   |

FONTE: Adaptado MIRSADEGHI et al., (2013)

A primeira equação da Tabela 4.4, desenvolvida por McAdams, possui alguns parâmetros para diferenciar superfícies lisas de rugosas, que são determinados a partir da Tabela 4.5.

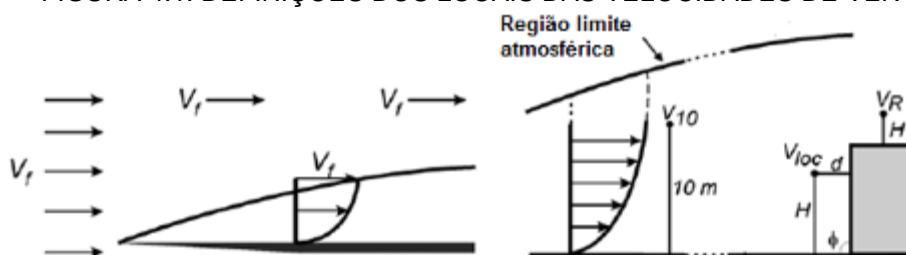
TABELA 4.5 - PARÂMETROS DO MODELO MCADAMS

| $V_f < 4,88 \text{ m/s}$ |      |      |   | $4,88 \text{ m/s} \leq V_f < 30,48 \text{ m/s}$ |      |      |
|--------------------------|------|------|---|---|------|------|
| Tipo de superfície       | m    | n    | p | m   | n    | p    |
| Lisa                     | 0,99 | 0,21 | 1 | 0   | 0,50 | 0,78 |
| Rugosa                   | 1,09 | 0,23 | 1 | 0   | 0,53 | 0,78 |

FONTE: Adaptado MIRSADEGHI et al., (2013)

Para a velocidade do vento, as equações da Tabela 4.4 possuem definições do local onde a velocidade foi considerada, conforme a ilustrado na Figura 4.1.

FIGURA 4.1: DEFINIÇÕES DOS LOCAIS DAS VELOCIDADES DE VENTO



FONTE: MIRSADEGHI et al., (2013)

Na Figura 4.1 pode-se verificar que os ventos considerados nas equações são definidos como:

$V_{10}$  é a velocidade de vento medido a 10 m de altura do solo (m/s);

$V_f$  é a velocidade de vento medido em local longe de qualquer objeto e das bordas (m/s);

$V_{loc}$  é a velocidade de vento medido a uma certa distância, d, da edificação e a uma certa altura H do solo (m/s).

$V_r$  é a velocidade de vento medido a uma certa altura H' do telhado da edificação. (m/s).

As equações descritas nos métodos de Jayamaha de 1996 e pela ISO 6946 não possuem informação de qual é o local onde foi considerada a velocidade do vento, com isso, é simbolizada apenas por:  $v$  (m/s).

Já para o coeficiente convectivo interno, as equações obtidas em experimentos estão descritas na Tabela 4.6.

TABELA 4.6 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO

| Modelos            | Descrição   | Equações W/(m²K)   |
|--------------------|---|--|
| ASHRAE<br>(1997)   | Placas grandes verticais – fluxo turbulento   | $h_{c,int}=0,19(\Delta T)^{0,33}$                                |
|                    | Placas pequenas verticais – laminar   | $h_{c,int}=0,29\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0,25}$           |
|                    | Placas grandes horizontais, voltadas para cima quando o ar é aquecido ou virados para baixo quando é resfriado – turbulento   | $h_{c,int}=0,22(\Delta T)^{0,33}$                                |
|                    | Placas grandes horizontais, voltadas para cima quando o ar é aquecido ou virado para baixo quando é resfriado – fluxo laminar | $h_{c,int}=0,27\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0,25}$           |
|                    | Placas pequenas horizontais, voltadas para cima quando o ar é resfriado ou virados para baixo quando o ar é aquecido.         | $h_{c,int}=0,12\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0,25}$           |
| ISO 6946:2007      | Fluxo ascendente (tabelado)   | 5,0  |
|                    | Fluxo horizontal (tabelado)   | 2,5  |
|                    | Fluxo descendente (tabelado)  | 0,7  |
| TRNSYS             | Superfícies verticais   | $h_{c,int}=1,5\Delta T^{0,25}$                                   |
| Fohanno e Polidori | Superfícies verticais – interno - laminar   | $h_{c,int}=1,332\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{1/4}$           |
|                    | Superfícies verticais – interno - turbulento  | $h_{c,int}=1,235\exp(0,0467H)(\Delta T)^{0,316}$                 |
| Min                | Todas as superfícies  | $h_{c,int}=1,646\left(\frac{\Delta T^{0,32}}{H^{0,05}}\right)$   |
| Awbi and Hatton    | -   | $h_{c,int}=1,832\left(\frac{\Delta T^{0,293}}{H^{0,121}}\right)$ |

FONTE: Adaptado HARKOUSS (2013) e WANG (2000)



Para as equações contidas na Tabela 4.6 tem-se que:

$\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente (K);

$H$  é a altura a partir do piso (m).

Percebe-se ao analisar as equações dos coeficientes convectivos externos e internos que os coeficientes externos são mais dependentes fortemente do vento do que os coeficientes internos, pois, obviamente, internamente a velocidade de vento é desconsiderada.

#### 4.1.4 Considerações sobre os métodos para cálculo dos coeficientes convectivos superficiais

Foi verificado que existem diversos métodos para obtenção dos coeficientes convectivos superficiais. A consequência disso é que valores diferentes podem ser encontrados para seu cálculo, dependendo do método adotado.

Para a norma brasileira NBR 15220-2 (ABNT 2005), verificou-se que são sugeridos valores constantes de resistências superficiais e o método utilizado que resultou nos valores da NBR 15220-2 (ABNT 2005) está descrita na ISO 6946. É possível verificar que esse método apresenta, em algumas etapas, valores também tabelados de parâmetros, tal como para o coeficiente convectivo interno  $h_{c,int}$ , conforme demonstrado na Tabela 4.2, sem informar o procedimento utilizado para obtenção desses valores. Para o coeficiente convectivo externo,  $h_{c,ext}$ , é apresentada uma equação em função da velocidade do vento, equação (30), contudo, não são fornecidas informações das condições do experimento que originaram essa equação. Ainda, na norma ISO 6946, são informados os valores de emissividade, temperatura e velocidade do vento que foram utilizados no método para obtenção dos valores sugeridos pela NBR 15220-2 (ABNT 2005), conforme Tabela 4.3, indicando que foi considerada uma região de clima frio.

Na revisão bibliográfica realizada no capítulo 2, foi evidenciado que os fenômenos térmicos que influenciam o valor das resistências térmicas dependem de diversas grandezas físicas que podem variar no meio ambiente, tais como pressão, temperatura e velocidade de escoamento do fluido (velocidade do vento para o caso

de edificações). Nas equações descritas segundo experimentos, verifica-se que a resistência superficial interna é dependente mais significativamente da diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente; já a resistência superficial externa depende mais fortemente da velocidade do vento, conforme descrito no estado da arte.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DE LOCAIS COM VARIAÇÃO CLIMÁTICA PARA SIMULAÇÃO

Como visto no capítulo 2 o Brasil está dividido em oito zonas bioclimáticas, caracterizadas pela média das temperaturas mínimas, das máximas e umidade relativa, conforme método apresentado na norma NBR 15220-3 (ABNT 2005).

Para a simulação e análise do impacto dos diferentes métodos de cálculo dos coeficientes convectivos serão consideradas as oito zonas. Para isso, serão realizadas simulações em uma cidade de cada zona bioclimática. As cidades e suas respectivas zonas bioclimáticas estão descritas na Tabela 4.7.

Para o levantamento dos dados climáticos de cada cidade foi consultada a base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Os arquivos apresentam temperaturas médias horárias no período de 2001 até 2010.

TABELA 4.7 - CIDADES A SEREM UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES

| <b>Cidade</b>        | <b>Zona Bioclimática</b> |
|----------------------|--------------------------|
| Curitiba             | 1                        |
| Santa Maria          | 2                        |
| Belo Horizonte       | 3                        |
| Brasília             | 4                        |
| Vitória da Conquista | 5                        |
| Campo Grande         | 6                        |
| Cuiabá               | 7                        |
| Belém                | 8                        |

FONTE: A Autora (2017).

### 4.3 DEMANDA DE ENERGIA CONSIDERANDO DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO SUPERFICIAL

Para a realização da análise da demanda de energia considerando diferentes métodos de cálculo do coeficiente convectivo superficial, foi organizado o seguinte procedimento, executado nessa ordem.

- Para cada método de cálculo levantado, foi verificada a variação dos valores dos coeficientes convectivos utilizando diferentes valores climáticos.
- Com base na variação dos coeficientes convectivos, foram estabelecidos diferentes valores a serem utilizados nos cálculos de demanda de energia.
- Foi definida uma geometria de edificação padrão, para realização dos cálculos de demanda, para simulação em cada uma das oito cidades que representam as zonas bioclimáticas.
- Os resultados de demanda de energia de cada cidade foram compilados, para análise.

A seguir será detalhada a forma como cada etapa do procedimento descrito foi executado.

#### 4.3.1 Variação dos coeficientes convectivos utilizando diferentes valores climáticos

A análise da variação dos valores dos coeficientes convectivos superficiais com o método utilizado está separada em: coeficientes externos e coeficientes internos.

##### 4.3.1.1 Coeficiente convectivo externo

Como visto, as diversas equações disponíveis na literatura para obtenção dos coeficientes convectivos externos são bastante influenciadas pela velocidade do vento. Assim, para obter a variação desses coeficientes, conforme os diversos

climas foram inseridos vários valores de velocidade de vento, para a obtenção dos coeficientes convectivos. Contudo, é importante ressaltar que a velocidade do vento possui definições diferentes para cada equação, pois considera locais diferentes de representação, conforme visto anteriormente na Figura 4.1. Com isso, antes de inserir os valores nas equações, é necessário estabelecer as relações entre os diversos tipos de velocidade de vento, para que a comparação seja realizada para a velocidade no mesmo local.

Segundo Mirsadeghi et al. (2013), a relação entre  $V_{loc}$  e  $V_{10}$ , considerando uma parede vertical e com ângulo de direção de vento variando entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  com a superfície, é dada pela equação (31):

$$V_{loc} = V_{10} \sin \theta \quad (31)$$

onde

$\theta$  é o ângulo entre a direção do vento e a parede em graus ( $^\circ$ ).

Como o propósito do presente trabalho é verificar os resultados dos diferentes métodos, será considerada a mesma condição para todas elas, para que seja possível a análise. Assim, para esse estudo foi determinada a condição de ângulo de  $90^\circ$  entre o vento e a superfície, para todas as equações. Com isso a equação (31) resulta na equação (32):

$$V_{loc} = V_{10} \quad (32)$$

Com relação a  $V_f$  é assumida a seguinte relação, segundo Mirsadeghi et al. (2013), descrita na equação (33).

$$V_f = V_{loc} \quad (33)$$

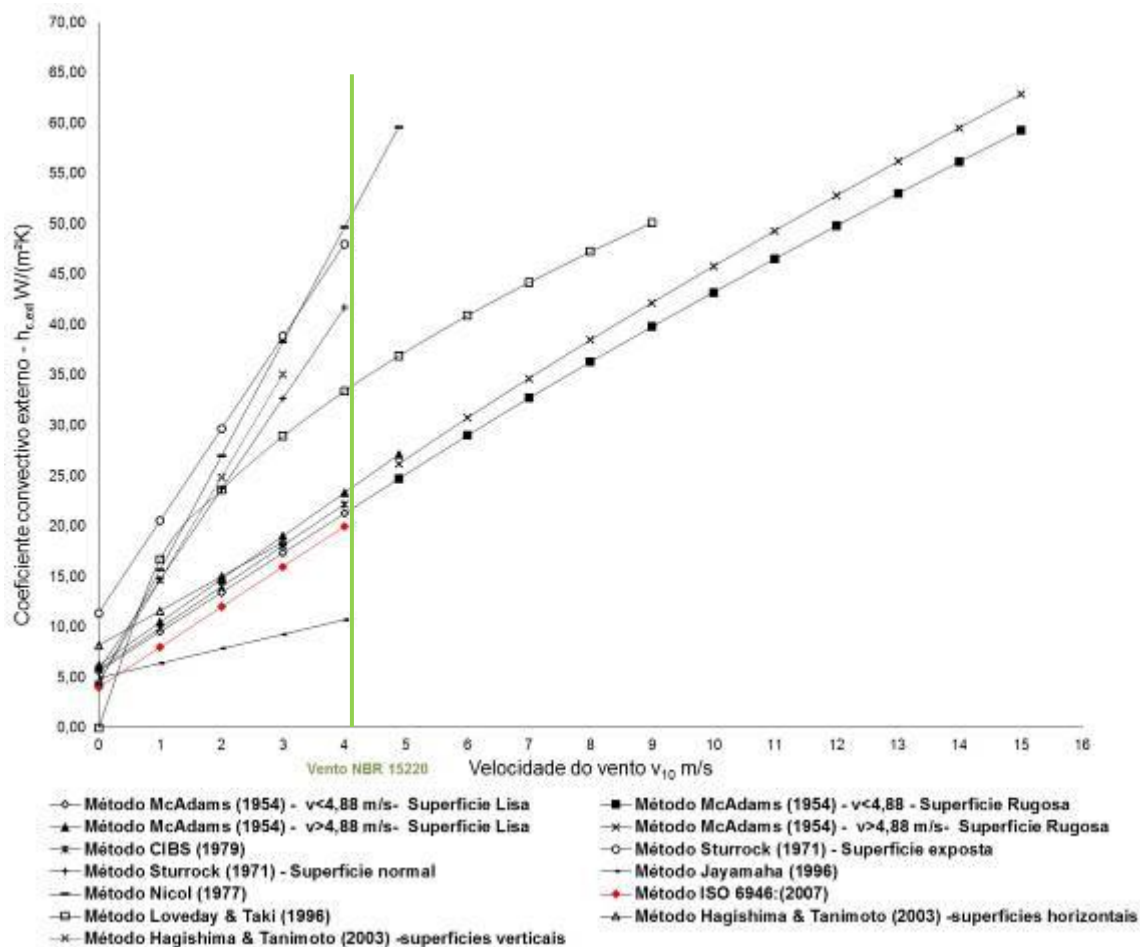
Com relação a  $V_r$  é dada a seguinte relação para as paredes, conforme demonstrado na equação (34).

$$V_{loc} = \frac{2}{3} V_r \quad (34)$$

É importante ressaltar que essas correlações entre os diversos tipos de velocidades de vento são aquelas utilizadas por softwares de cálculo de consumo de energia, não sendo, portanto, válidas para todas as condições em sistemas reais. O cálculo de demanda realizado pelos softwares fornece como resultado a energia utilizada para manter a temperatura pré-estabelecida em um ambiente, considerando a variação de diversas outras grandezas. Quando é necessário retirar calor do ambiente para manter a temperatura, isso indica que o ambiente precisa de refrigeração, quando é necessário fornecer calor, o ambiente precisa de aquecimento.

Com as relações demonstradas nas equações de (32) a (34) é possível calcular o coeficiente convectivo externo em função da mesma velocidade de vento  $V_{10}$ . Os valores obtidos para cada método, em função da variação do vento, considerando a faixa de velocidade de vento aplicável para cada método, estão expostos no gráfico da Figura 4.2.

FIGURA 4.2 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO COM A VELOCIDADE DO VENTO



FONTE: A Autora (2017).

Para os métodos que não exibiam informação da faixa de vento aplicável, foi considerada uma velocidade máxima de 4 m/s, pois é a mesma aplicada na NBR 15220-2. A curva em vermelho corresponde ao método que considera a radiação em suas equações.

Percebe-se ao analisar a Figura 4.2 que o método utilizado na ISO 6946, que é o mesmo da NBR 15220-2 (ABNT 2005), e que utiliza velocidade de vento de 4 m/s, apresenta valores diferentes de coeficiente convectivo externo, se comparado com outros métodos, para o mesmo valor de velocidade de vento.

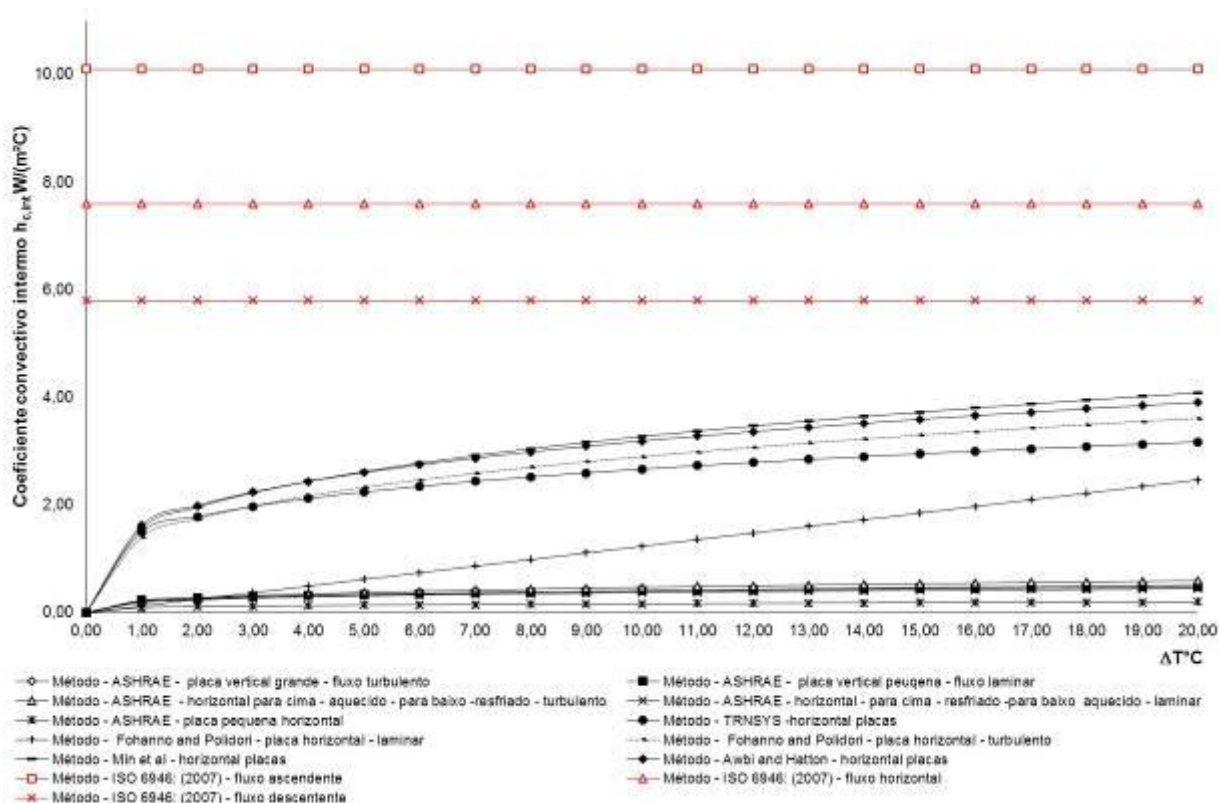
#### 4.3.1.2 Coeficiente convectivo interno

Para o coeficiente convectivo interno, verifica-se que os métodos disponíveis, apresentados no capítulo 3, demonstram forte dependência da diferença de temperatura entre a parede e o ambiente. Com isso, foi realizada uma análise inserindo-se vários valores de diferença de temperaturas, em cada método, para obtenção do valor do coeficiente convectivo interno.

Os resultados estão descritos no gráfico da Figura 4.3. As curvas em vermelho correspondem aos métodos que consideram a radiação em suas equações.

Nos resultados demonstrados na Figura 4.3 verifica-se que os coeficientes convectivos internos podem variar de 0 a 10 W/(m<sup>2</sup>K) quando a diferença de temperatura varia de 0 a 20 °C. O método utilizado na ISO 6946 não apresenta variação, pois os valores apresentados na norma são constantes, sem descrição do processo utilizado para sua obtenção, e são os maiores valores quando comparados com outros métodos.

FIGURA 4.3 VARIAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO COM A DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE A SUPERFÍCIE E O AMBIENTE



FONTE: A Autora (2017).

Uma consequência deste último fato já pode ser prevista.

Ao pensar-se em termos de resistência térmica, procura-se o valor obtido com a ABNT NBR 15220 (2005) para o coeficiente de filme externo,  $R_{se} = 1/20 \text{ m}^2\text{K/W}$ , e compara-se com os valores extremos, para o mesmo valor de velocidade de vento da NBR:

$$1/100 < 1/20 < 1/10 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Ou ainda:

$$0,010 < 0,050 < 0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$$

O maior prejuízo possível em termos de resistência térmica, aqui, ao se adotar o critério da ABNT NBR 15220 (2005) e não qualquer outro hipoteticamente mais correto é de  $0,050 - 0,100 = -0,050 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Porém, tal valor é pouco provável,

pois refere-se a três modelos, apenas, cujos valores estimados para  $h_{c,ext}$  são inferiores que a da NBR 15220.

O maior excesso possível em termos de resistência térmica, aqui, ao se adotar o critério da ABNT NBR 15220 (2005) e não qualquer outro hipoteticamente mais correto é de  $0,050 - 0,010 = 0,040 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Para o coeficiente de filme interno, fluxo horizontal, compara-se  $R_{si} = 1/8 \text{ m}^2\text{K/W}$  com os valores extremos:

$$1/8 < 1/3 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Ou ainda:

$$0,125 < 0,333 \text{ m}^2\text{K/W}$$

O maior prejuízo possível em termos de resistência térmica, aqui, ao se adotar o critério da ABNT NBR 15220 (2005) e não qualquer outro hipoteticamente mais correto é de  $0,125 - 0,333 = -0,208 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Não há possibilidade de excesso ao se adotar o critério da ABNT NBR 15220 (2005) e não há qualquer outro hipoteticamente mais correto.

Em resumo, o erro de estimativa seria:

de  $R_{se}$ :  $-0,050$  a  $0,040 \text{ m}^2\text{K/W}$  (sendo o limite negativo pouco provável)

de  $R_{si}$ :  $-0,208$  a  $0,000 \text{ m}^2\text{K/W}$

de  $R_t$ :  $-0,258$  a  $0,040 \text{ m}^2\text{K/W}$

Enfim, conclui-se que:

- uma impropriedade da ABNT NBR 15220 (2005) sobre o lado interno influencia muito mais do que no lado externo;
- ao se aplicar a ABNT NBR 15220 (2005), o máximo déficit possível de  $R_t$  é, em módulo, seis vezes maior que o máximo excesso de  $R_t$ .



Existe, portanto, forte tendência de  $R_t$  calculado pela ABNT NBR 15220 (2005) 15220 ser menor que o valor real. Isto significaria, em termos práticos:

- se a carga térmica predominante for de aquecimento, há tendência de os sistemas serem superdimensionados, com desperdício de energia e possível prejuízo do conforto térmico;
- se a carga térmica predominante for de refrigeração, há probabilidade de os sistemas serem subdimensionados, com prejuízo do conforto térmico.

#### 4.3.2 Determinação dos valores a serem utilizados nas simulações

O método utilizado na NBR 15220-2 (ABNT 2005), que é empregada no Brasil, considera um valor de vento de 4,0 m/s para o cálculo que resultou nos coeficientes convectivos externos tabelados na norma. Como o objetivo é verificar a variação dos resultados entre os métodos de cálculo dos coeficientes convectivos, para efeito de comparação das equações, observa-se que para o vento de 4,0 m/s (considerando-o como  $v_{10}$ ) os valores obtidos para os coeficientes convectivos externos, variam entre 10,0 e 60,0 W/m<sup>2</sup>K aproximadamente, sendo 25 W/m<sup>2</sup>K para a NBR, com isso, a estratégia para análise será realizar simulação para valores entre 8,0 e 40,0 W/(m<sup>2</sup>K).

Já para o valor do coeficiente convectivo interno, sugerido pela NBR 15220-2 (ABNT 2005), não se apresenta o método de cálculo, com isso, na Figura 4.3 ele é apresentado de forma constante. Mas sabe-se que ele deve variar com a diferença de temperatura, assim, será utilizada na simulação a variação entre os métodos, apresentado na Figura 4.3 de 1,0 a 2,5 W/(m<sup>2</sup>K), considerando fluxo horizontal de calor, para o ambiente da edificação a ser simulada. É importante ressaltar que no método utilizado na NBR, é somada a parcela da radiação, assim, o valor de 2,5 W somado à radiação resulta em 7,6 W, assim, a variação do coeficiente convectivo interno a ser utilizada nas variações será de 5,5 até 10,0 W/(m<sup>2</sup>K).

É importante considerar que durante o projeto térmico poderiam ser usadas diversas combinações de valores de coeficientes externos com coeficientes internos, logo, na simulação, será considerada essa possibilidade. Na Tabela 4.8 são indicadas as diversas combinações de valores de coeficiente externo e interno a

serem utilizadas em cada simulação, no total serão 12 simulações para cada uma das oito cidades, totalizando 96 simulações.

Observa-se na Tabela 4.8 que os valores de 25,0 e 7,6 W/(m<sup>2</sup>K) para o coeficiente convectivo externo e interno, respectivamente, referem-se aos valores sugeridos pela NBR 15220-2 (ABNT 2005). É importante ressaltar que o valor de 7,6 W/(m<sup>2</sup>K) contempla a soma da parcela do coeficiente devido à radiação equivalente a 5,1 W/(m<sup>2</sup>K), conforme o método descrito no item 3.2.1.2. Nos demais métodos a radiação não é considerada nas equações, pois os demais métodos foram obtidos de forma empírica.

TABELA 4.8 - COMBINAÇÕES DE VALORES DE COEFICIENTES A SEREM USADOS DAS SIMULAÇÕES

| Coeficiente convectivo externo $h_{c,ext}$ W/(m <sup>2</sup> K) |      | Coeficiente convectivo interno – $h_{c,int}$ W/(m <sup>2</sup> K) |         |         |
|---|------|---|---------|---------|
|   |      | 5,5   | 7,6     | 10,0    |
|   | 8,0  | sim. 1  | sim. 2  | sim. 3  |
|   | 16,0 | sim. 4  | sim. 5  | sim. 6  |
|   | 25,0 | sim. 7  | sim. 8  | sim. 9  |
|   | 40,0 | sim. 10   | sim. 11 | sim. 12 |

FONTE: A Autora (2017).

Para realizar cada etapa da simulação, outras grandezas devem ser consideradas, tais como fontes de calor internas, bem como a temperatura a ser mantida internamente. Assim, foram consideradas as seguintes premissas para as simulações:

- Temperatura interna a ser mantida entre 20,0 °C e 26,0 °C;
- Fonte de calor interna considerando uma pessoa constantemente dentro do ambiente, fornecendo 100,0 W de taxa de produção de calor;
- Fonte de calor considerando uma lâmpada no período entre 18 h e 24 h, com valor de 50 W de taxa de produção de calor.

### 4.3.3 Simulação

As simulações foram realizadas em uma ferramenta computacional. O software utilizado, denominado *Mestre*, é um sistema para simulação do comportamento térmico de edificações em múltiplas zonas, utilizando linguagem Java. As vantagens da utilização desse software são: portabilidade, caráter compacto, gratuidade e utilização de dados relativamente simples. A análise é feita com as seguintes considerações:

- Múltiplas zonas (ar) e múltiplos elementos de interface entre as zonas (sólidos);
- Aplicação de diferenças finitas simples no eixo do tempo e no eixo do espaço, nas interfaces sólido-ar do edifício;
- Discretização dos raios solares numa malha regular;
- Aplicação do fluxo radiante a partir de cada raio sol como geração de calor nas superfícies transparentes, depois nas superfícies opacas em que incidirem (na proporção das absorvidades), e o restante como fonte de aquecimento para a própria zona que absorveu tal raio;
- Nas superfícies opacas expostas ao sol, aplicação do conceito de temperatura sol-ar (ou seja, eleva-se a temperatura do ar de modo a reproduzir, nas superfícies externas das paredes, o efeito do fluxo de calor radiante do sol que é absorvido e transmitido em parte para dentro da parede, em parte ao ar);
- Além da radiação solar, ausência de outras trocas radiantes significativas afetando o ambiente;
- Armazenamento de calor nos elementos sólidos.

Um arquivo-texto é utilizado como entrada de dados com quebra de linhas, contendo séries de dados separados por espaço. Cada grupo de dados é iniciado por um dos seguintes comandos:

- “d” para entrada de dados gerais da simulação, clima e parâmetros de plotagem e convergência;
- “p” para entrada de paredes;
- “z” para entrada de zonas;
- “m” para entrada de materiais;
- “ta” para entrada de temperatura atmosférica em séries horárias.

O software *Mestre* é bastante útil para a compreensão dos processos térmicos. Considera a insolação, a transmissão e o armazenamento de calor. Como resultado, pode-se obter

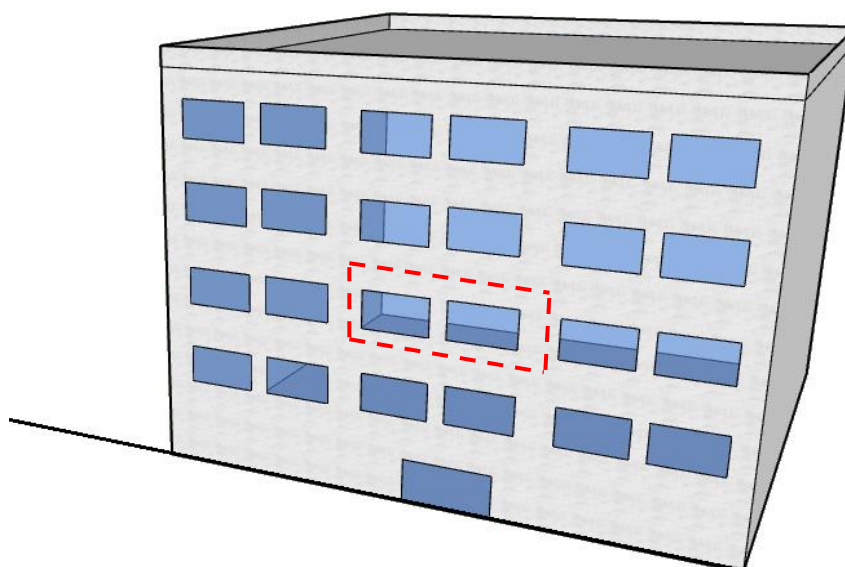
- as marchas de temperatura do ar em cada zona para um determinado consumo de energia;
- o consumo de energia em cada zona para temperatura do ar dentro de uma faixa de conforto térmico preestabelecida.

O último caso foi utilizado no presente trabalho (SCHMID, 2001).

O modelo adotado para simulação foi o de uma edificação de múltiplos pavimentos com projeção retangular, a ser utilizada em todas as cidades. As dimensões estão demonstradas nas Figuras 4.5 e 4.6 e na Tabela 4.9.

Apenas uma superfície foi considerada em contato com o exterior, composta de parede de alvenaria e duas janelas de vidro temperado, sem esquadria. É importante ressaltar que a edificação a ser utilizada é relativamente simples, pois o objetivo principal é obter os resultados para efeito de comparação entre os resultados dos diferentes métodos.

FIGURA 4.4 - EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS ANDARES



FONTE: A Autora (2017).

Outras superfícies são consideradas adiabáticas, já que separam a unidade em análise dos pavimentos acima e abaixo, das unidades ao lado e ainda o corredor de circulação, que se supõe permanecerem sob mesmas condições térmicas do apartamento analisado. A Tabela 4.9 apresenta as propriedades dos materiais utilizadas no cálculo.

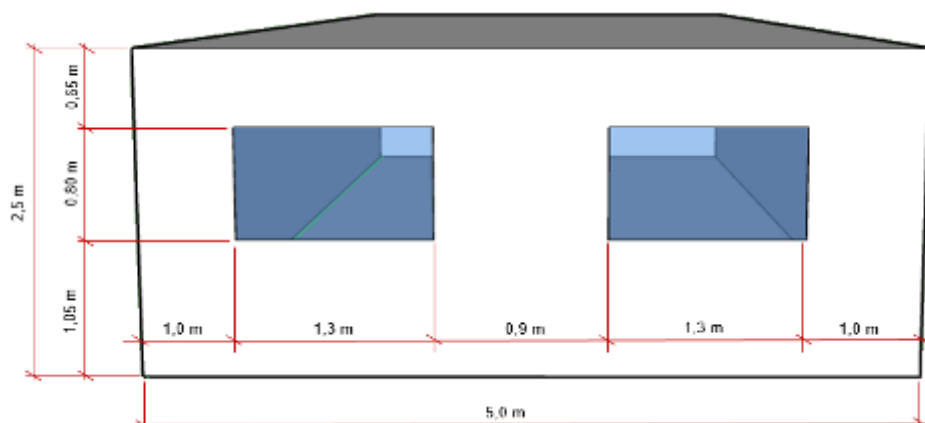
TABELA 4.9 - VALORES DOS MATERIAIS UTILIZADOS

| Componente | Espessura (m) | Condutividade térmica (W/(mK)) | Área (m²) | Resistência térmica (m²K)/W |
|------------|---------------|--------------------------------|-----------|-----------------------------|
| Alvenaria  | 0,120         | 0,600                          | 11,670    | 0,200                       |
| Vidro      | 0,004         | 1,000                          | 2,080     | 0,004                       |

FONTE: A Autora (2017).

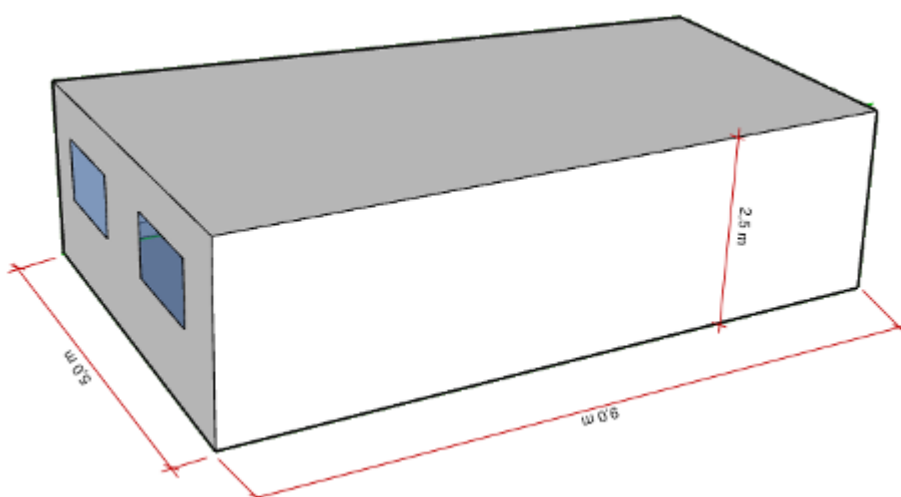
Foi considerado no cálculo um fluxo de ar na ventilação dado pelo valor mínimo por pessoa de 27 m³/h, conforme Portaria 3523 (BRASIL, 1998), considerando uma pessoa em seu interior. As dimensões do ambiente utilizado nos cálculos são de 5,5 m de largura, 9,0 m de profundidade e altura do pé direito de 2,5 m conforme as Figuras 4.5 e 4.6.

FIGURA 4.5 – ELEVAÇÃO FRONTAL DO AMBIENTE DA EDIFICAÇÃO



FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.6 - ISOMÉTRICA DO AMBIENTE DA EDIFICAÇÃO



FONTE: A Autora (2017).

## 4.4 RESULTADOS

Os resultados obtidos nas simulações de demanda energética para cada cidade serão expostos a seguir. Serão apresentados os valores de demanda de energia e potência máxima para diversas combinações de possíveis valores de coeficientes convectivos externos e internos, para cada cidade considerada.

### 4.4.1 Curitiba - Z1

A energia necessária por ano para manter o ambiente entre 20 °C e 26 °C na cidade de Curitiba, para diversas combinações de valores de coeficientes convectivos externos e internos, está descrita na Tabela 4.10, onde estão em vermelho os valores máximos e mínimos, e em azul os valores obtidos com o método da NBR 15220-2 (ABNT 2005). Os valores representam a energia total, independente se é para aquecimento ou resfriamento.

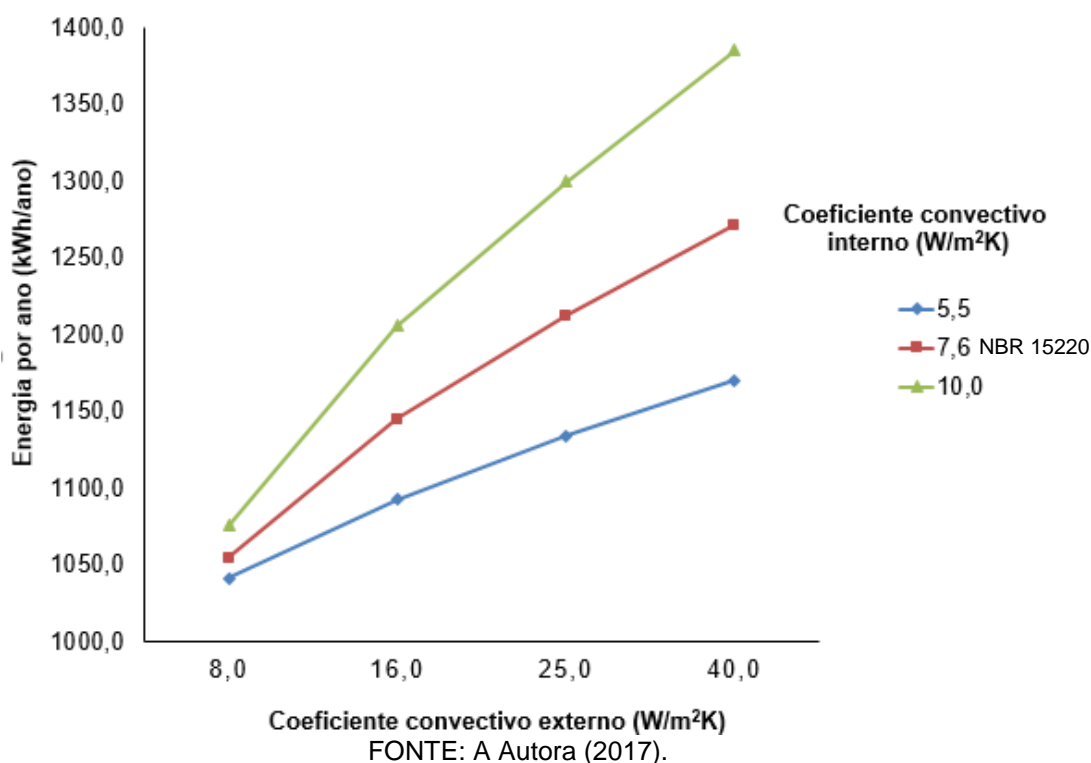
A variação de energia é mais sensível à variação do coeficiente convectivo interno. Assim, na Figura 4.7 são apresentados os valores separados por curvas para cada coeficiente convectivo interno.

TABELA 4.10 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM CURITIBA

| Energia por ano (kWh/ano)          |      |                                    |         |         |
|------------------------------------|------|------------------------------------|---------|---------|
|                                    |      | $h_c$ interno W/(m <sup>2</sup> K) |         |         |
|                                    |      | 5,5                                | 7,6     | 10,0    |
| $h_c$ externo W/(m <sup>2</sup> K) | 8,0  | 1041,16                            | 1054,33 | 1075,5  |
|                                    | 16,0 | 1092,68                            | 1145,04 | 1205,31 |
|                                    | 25,0 | 1133,78                            | 1212,21 | 1299,46 |
|                                    | 40,0 | 1169,83                            | 1271,38 | 1384,85 |

FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.7 - ENERGIA TOTAL NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA



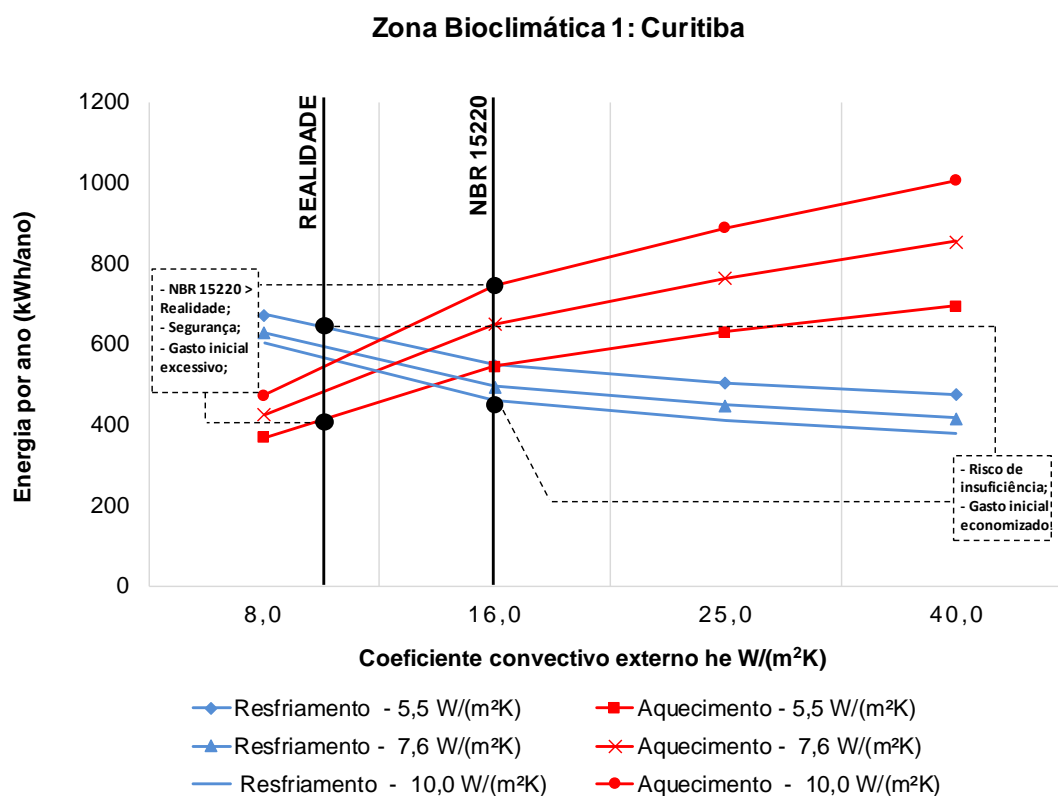
No gráfico da Figura 4.8, para melhor análise, são apresentados os valores com curvas para cada valor do coeficiente convectivo interno, separados por aquecimento e resfriamento. Na mesma figura os valores obtidos com o método da norma são comparados com valores mais baixos, com  $h_c$  interno de  $3,0 W/(m^2K)$ , hipoteticamente mais próximos da realidade, pois considera-se que o método da norma, resulta em maiores valores. Considerando que os projetistas utilizam o método da ABNT NBR 15220-2 (2005), quando a demanda de energia obtida estiver maior com os valores de coeficiente desta norma, há indício de que o sistema de condicionamento de ar estará superdimensionado, quando comparado com a hipotética realidade, que indica uma demanda menor. O contrário é válido, ou seja, quando a demanda da NBR é menor, indica que o sistema pode estar subdimensionado. Essa análise está indicada na Figura 4.8.

Outro dado importante é a potência máxima exigida durante o período de simulação, para o fornecimento de calor. Esse valor pode ser usado qualitativamente para comparar os métodos, pois, de forma simples, poderia-se considerar que a potência de um sistema de condicionamento de ar deve possuir capacidade mínima



igual ou superior à demanda máxima solicitada. A potência máxima exigida do sistema foi analisada para as simulações que apresentaram a maior e a menor demanda de energia. Também foi analisada a potência máxima obtida para os valores de coeficientes sugeridos pela NBR 15220-2. Os valores estão demonstrados na Tabela 4.11.

FIGURA 4.8 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C



FONTE: A Autora (2017).

TABELA 4.11 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA

| ENERGIA POR ANO                  |                         |                              |                         |
|----------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
|                                  | MÍNIMA<br>(SIMULAÇÃO 1) | NBR 15220-2<br>(SIMULAÇÃO 8) | MÁXIMA<br>(SIMULAÇÃO 9) |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE RES-FRIAMENTO | 735,0 W                 | 760,0 W                      | 789,0 W                 |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO   | 593, W                  | 861,0 W                      | 959,0 W                 |

FONTE: A Autora (2017).

Os resultados obtidos para as demais cidades serão expostos seguindo o mesmo padrão utilizado para a cidade de Curitiba. Assim, a seguir, estarão apresentadas as tabelas e gráficos, segundo os critérios utilizados no item 4.4.1.

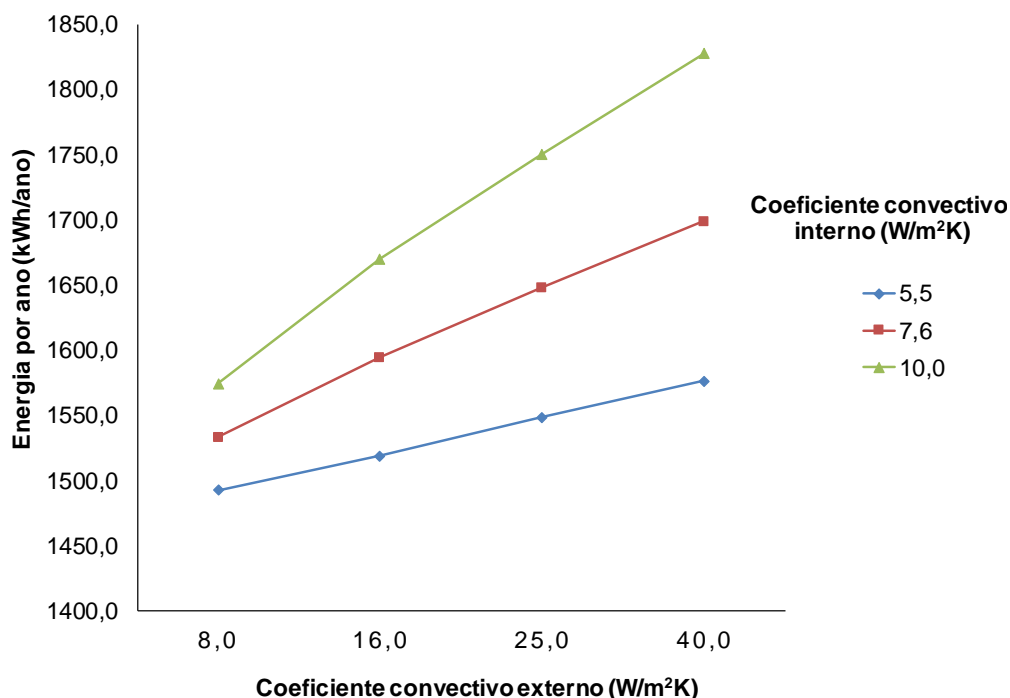
#### 4.4.2 Santa Maria - Z2

TABELA 4.12 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM SANTA MARIA

| ENERGIA POR ANO                       |      |                                    |         |         |
|---------------------------------------|------|------------------------------------|---------|---------|
|                                       |      | $h_c$ interno W/(m <sup>2</sup> K) |         |         |
|                                       |      | 5,5                                | 7,6     | 10,0    |
| $h_c$ externo<br>W/(m <sup>2</sup> K) | 8,0  | 1492,48                            | 1533,06 | 1574,18 |
|                                       | 16,0 | 1518,83                            | 1594,37 | 1670,23 |
|                                       | 25,0 | 1548,39                            | 1648,16 | 1750,63 |
|                                       | 40,0 | 1576,34                            | 1699,09 | 1827,77 |

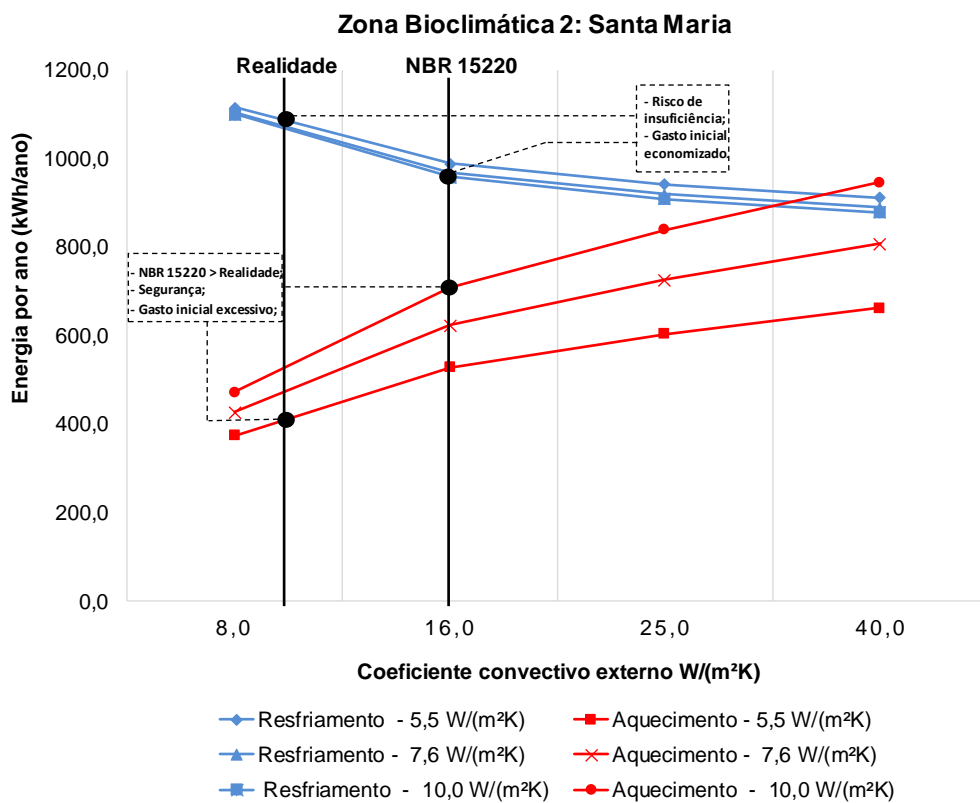
FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.9 - ENERGIA TOTAL NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA



FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.10 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C



FONTE: A Autora (2017).

TABELA 4.13 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA

| ENERGIA POR ANO                 |                         |                              |                          |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------|
|                                 | MÍNIMA<br>(SIMULAÇÃO 1) | NBR 15220-2<br>(SIMULAÇÃO 8) | MÁXIMA<br>(SIMULAÇÃO 12) |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO | 1000,0 W                | 1160,0 W                     | 1176,0 W                 |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO  | 757,0 W                 | 1166,0 W                     | 1237,0 W                 |

FONTE: A Autora (2017).

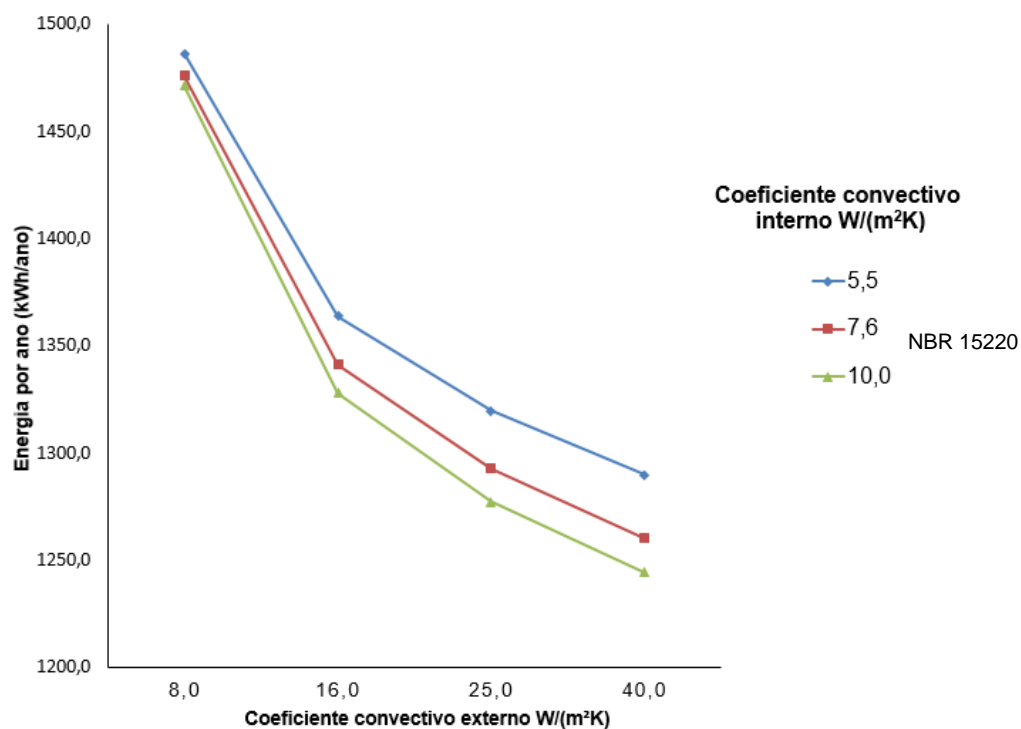
## 4.4.3 Belo Horizonte – Z3

TABELA 4.14 ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM BELO HORIZONTE

| Energia por ano (kWh/ano)             |      |                                    |         |         |
|---------------------------------------|------|------------------------------------|---------|---------|
|                                       |      | $h_c$ interno W/(m <sup>2</sup> K) |         |         |
|                                       |      | 5,5                                | 7,6     | 10,0    |
| $h_c$ externo<br>W/(m <sup>2</sup> K) | 8,0  | 1486,19                            | 1475,95 | 1471,31 |
|                                       | 16,0 | 1363,59                            | 1341,17 | 1327,90 |
|                                       | 25,0 | 1319,60                            | 1292,58 | 1277,03 |
|                                       | 40,0 | 1289,51                            | 1259,99 | 1244,10 |

FONTE: A Autora (2017).

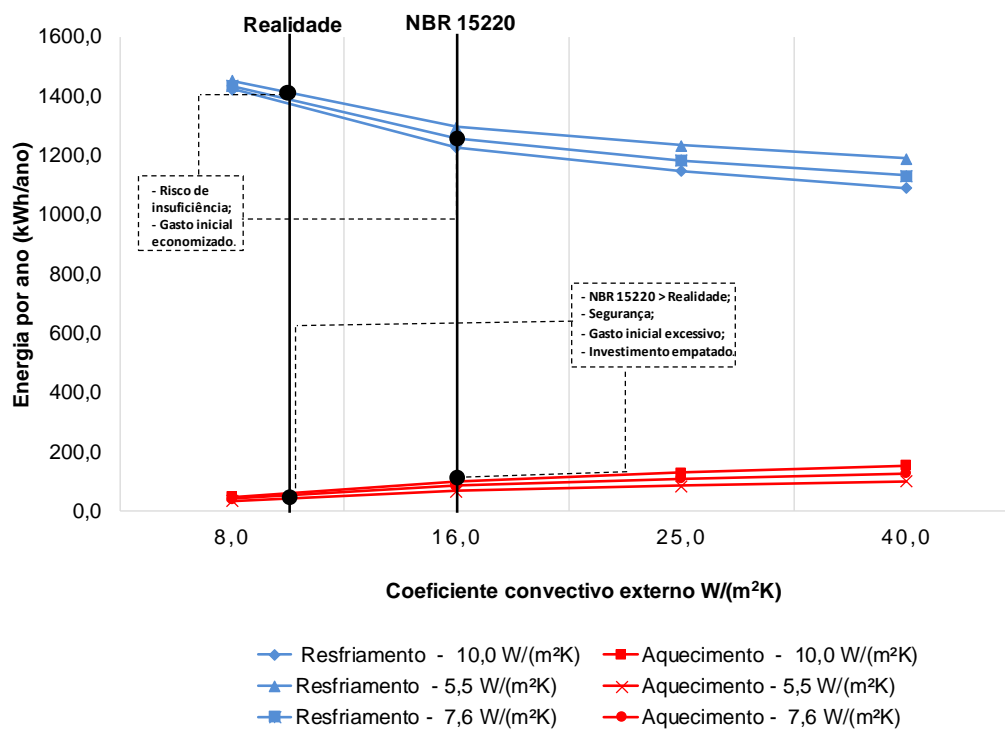
FIGURA 4.11 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA



FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.12 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C

Zona Bioclimática 3: Belo Horizonte



FONTE: A Autora (2017).

TABELA 4.15 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA

| ENERGIA POR ANO                 |                          |                              |                         |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|
|                                 | MÍNIMA<br>(SIMULAÇÃO 12) | NBR 15220-2<br>(SIMULAÇÃO 6) | MÁXIMA<br>(SIMULAÇÃO 1) |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO | 1010,0 W                 | 940,0 W                      | 865,0 W                 |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO  | 651,0 W                  | 540,0 W                      | 344,0 W                 |

FONTE: A Autora (2017).

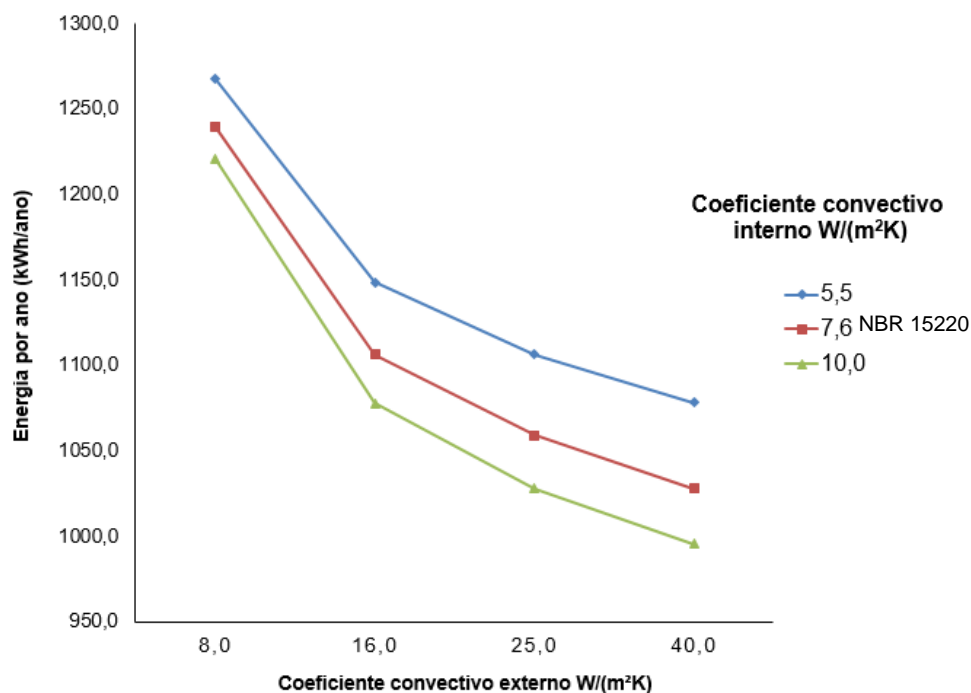
## 4.4.4 Brasília – Z4

TABELA 4.16 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM BRASÍLIA

| Energia por ano (kWh/ano)          |    |                                    |         |         |
|------------------------------------|----|------------------------------------|---------|---------|
|                                    |    | $h_c$ interno W/(m <sup>2</sup> K) |         |         |
|                                    |    | 5,5                                | 7,6     | 10      |
| $h_c$ externo W/(m <sup>2</sup> K) | 8  | 1267,56                            | 1239,2  | 1220,61 |
|                                    | 16 | 1148,66                            | 1106,39 | 1078,08 |
|                                    | 25 | 1106,48                            | 1059,18 | 1028,01 |
|                                    | 40 | 1078,21                            | 1027,88 | 995,68  |

FONTE: A Autora (2017).

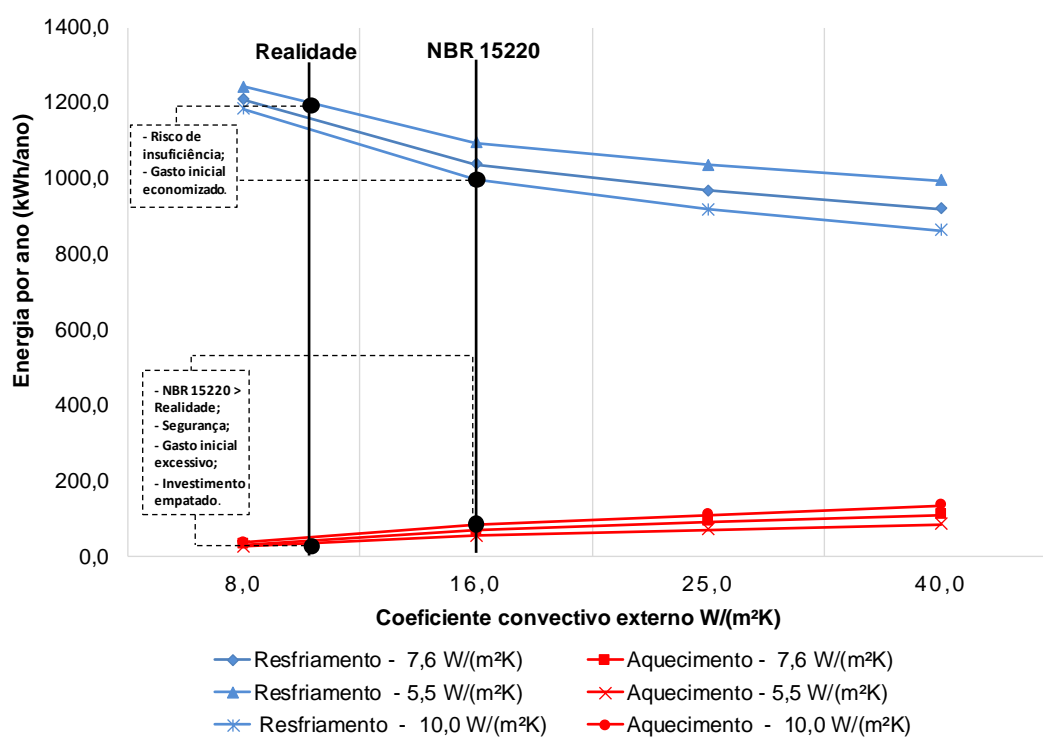
FIGURA 4.13 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA



FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.14 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C

Zona Bioclimática 4: Brasília



FONTE: A Autora (2017).

TABELA 4.17 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA

| ENERGIA POR ANO                 |                          |                              |                         |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|
|                                 | MÍNIMA<br>(SIMULAÇÃO 12) | NBR 15220-2<br>(SIMULAÇÃO 8) | MÁXIMA<br>(SIMULAÇÃO 1) |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO | 907,0 W                  | 865,0 W                      | 834,0 W                 |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO  | 507,0 W                  | 417,0 W                      | 255,0 W                 |

FONTE: A Autora (2017).

## 4.4.5 Vitória da Conquista – Z5

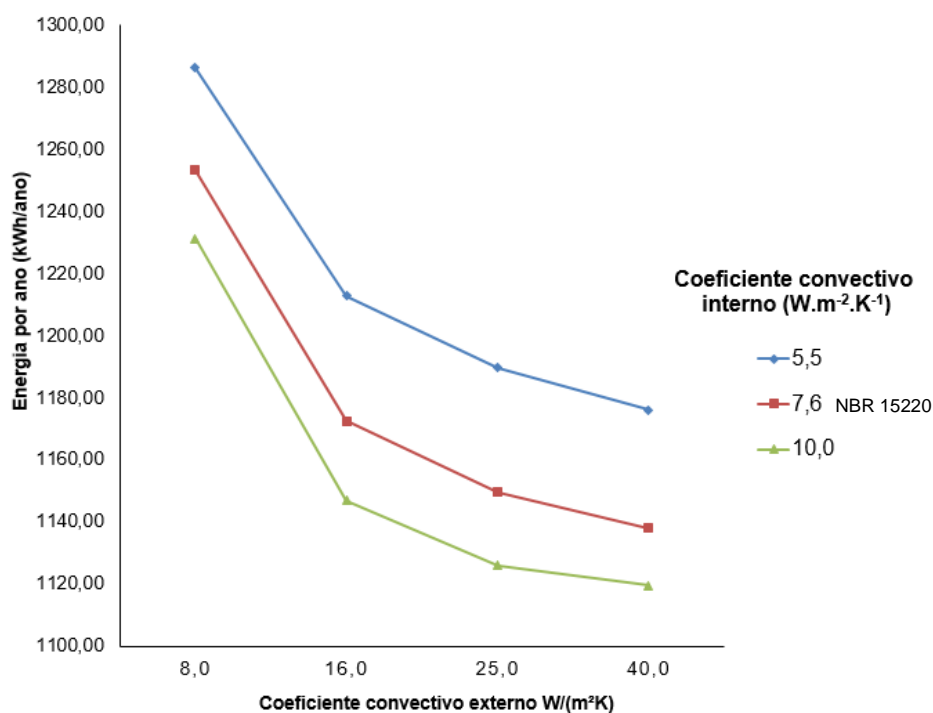
TABELA 4.18 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM VITÓRIA DA CONQUISTA

| Energia por ano (kWh/ano)             |    |                                    |         |         |
|---------------------------------------|----|------------------------------------|---------|---------|
|                                       |    | $h_c$ interno W/(m <sup>2</sup> K) |         |         |
|                                       |    | 5,5                                | 7,6     | 10      |
| $h_c$ externo<br>W/(m <sup>2</sup> K) | 8  | 1286,30                            | 1253,26 | 1231,2  |
|                                       | 16 | 1212,78                            | 1172,47 | 1146,96 |
|                                       | 25 | 1189,73                            | 1149,53 | 1126,1  |
|                                       | 40 | 1176,17                            | 1138,13 | 1119,63 |

FONTE: A Autora (2017).



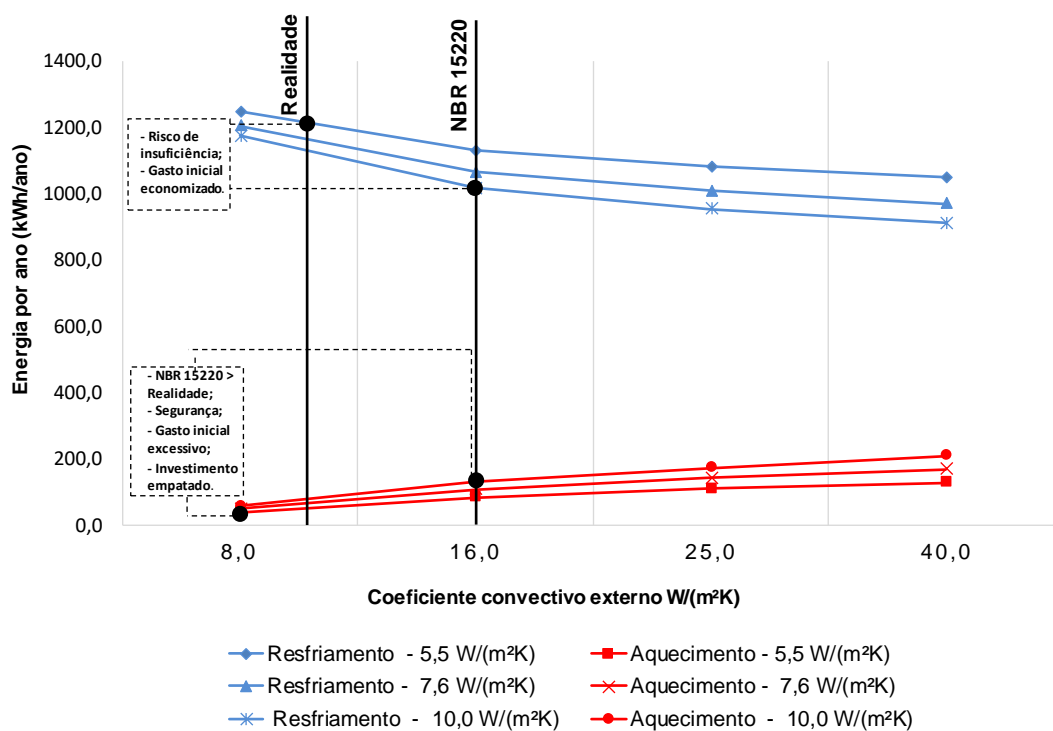
FIGURA 4.15 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA



FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.16 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C

Zona Bioclimática 5: Vitória da Conquista



FONTE: A Autora (2017).

TABELA 4.19 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA

| ENERGIA POR ANO                 |                          |                              |                         |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|
|                                 | MÍNIMA<br>(SIMULAÇÃO 12) | NBR 15220-2<br>(SIMULAÇÃO 8) | MÁXIMA<br>(SIMULAÇÃO 1) |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO | 1049,0 W                 | 982,0 W                      | 896,0 W                 |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO  | 569,0 W                  | 469,0 W                      | 298,0 W                 |

FONTE: A Autora (2017).

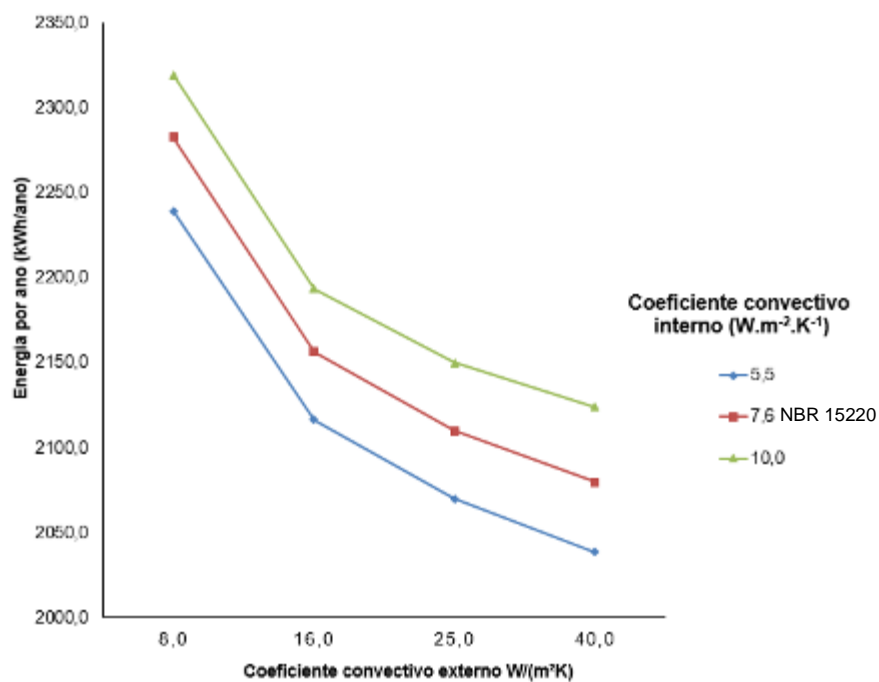
## 4.4.6 Campo Grande - Z6

TABELA 4.20 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM CAMPO GRANDE

| Energia por ano (kWh/ano)          |      |                                    |         |         |
|------------------------------------|------|------------------------------------|---------|---------|
|                                    |      | $h_c$ interno W/(m <sup>2</sup> K) |         |         |
|                                    |      | 5,5                                | 7,6     | 10,0    |
| $h_c$ externo W/(m <sup>2</sup> K) | 8,0  | 2239,13                            | 2282,82 | 2319,14 |
|                                    | 16,0 | 2116,54                            | 2156,34 | 2193,36 |
|                                    | 25,0 | 2070,10                            | 2110,19 | 2150,14 |
|                                    | 40,0 | 2038,70                            | 2079,99 | 2124,01 |

FONTE: A Autora (2017).

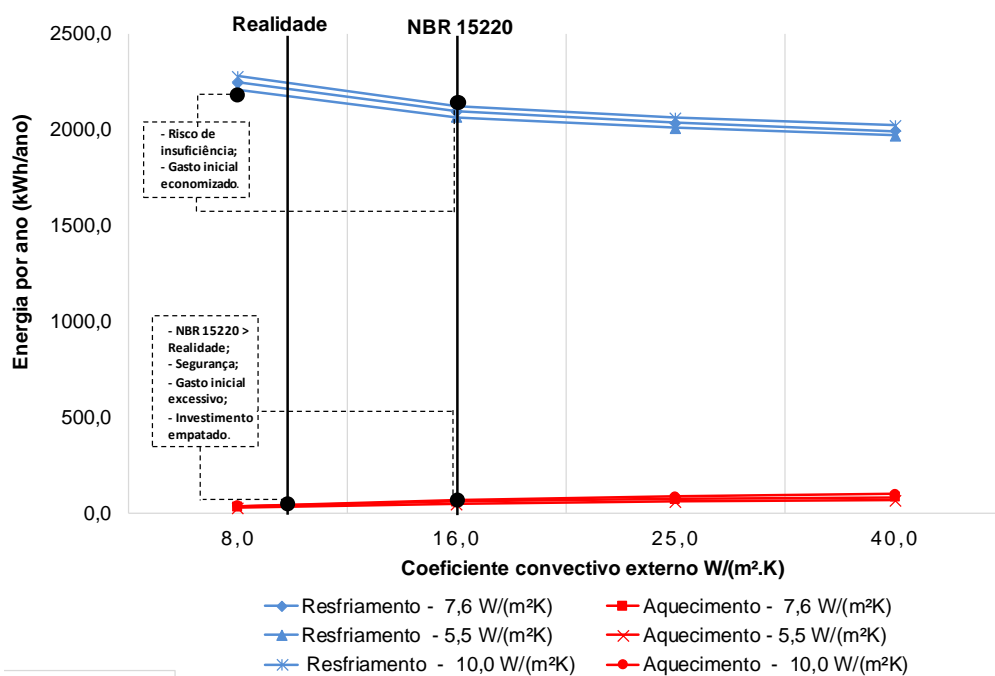
FIGURA 4.17 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA



FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.18 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C

Zona Bioclimática 6: Campo Grande



FONTE: A Autora (2017).

TABELA 4.21 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA

|                                 | ENERGIA POR ANO         |                              |                         |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
|                                 | MÍNIMA<br>(SIMULAÇÃO 7) | NBR 15220-2<br>(SIMULAÇÃO 8) | MÁXIMA<br>(SIMULAÇÃO 3) |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO | 1052,0 W                | 1085,0 W                     | 1095,0 W                |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO  | 802,0 W                 | 916,0 W                      | 769,0 W                 |

FONTE: A Autora (2017).

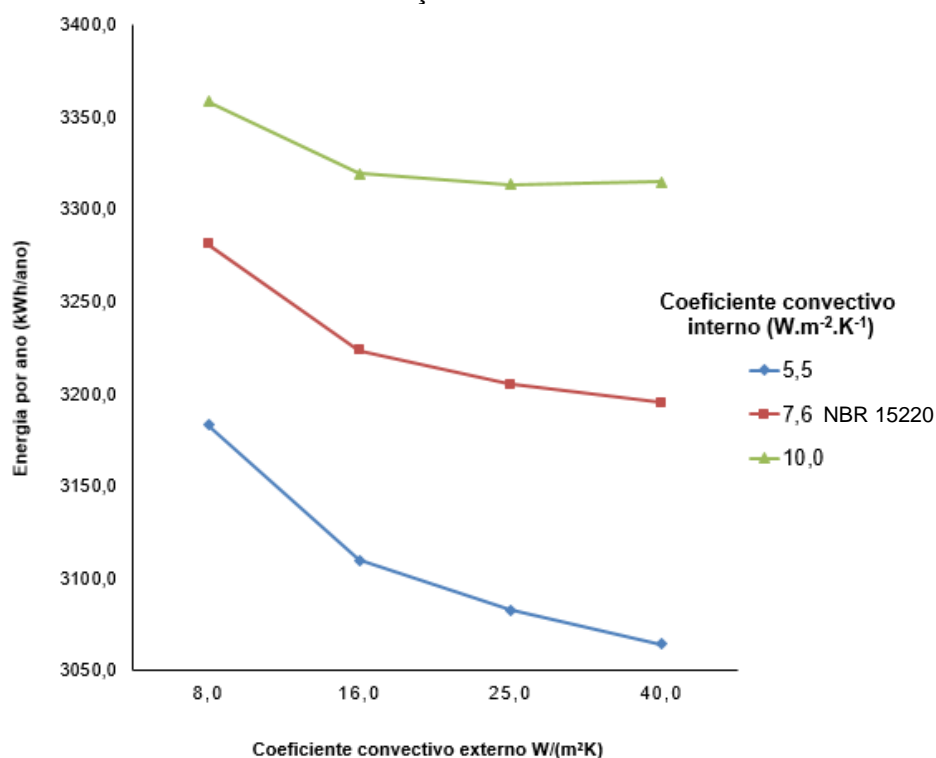
## 4.4.7 Cuiabá – Z7

TABELA 4.22 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM CUIABÁ

| Energia por ano (kWh/ano)         |      |                    |         |         |
|-----------------------------------|------|--------------------|---------|---------|
|                                   |      | hc interno W/(m²K) |         |         |
|                                   |      | 5,5                | 7,6     | 10,0    |
| h <sub>c</sub> externo<br>W/(m²K) | 8,0  | 3183,07            | 3281,28 | 3358,60 |
|                                   | 16,0 | 3110,12            | 3223,64 | 3319,64 |
|                                   | 25,0 | 3082,80            | 3205,33 | 3313,75 |
|                                   | 40,0 | 3064,49            | 3195,23 | 3315,22 |

FONTE: A Autora (2017).

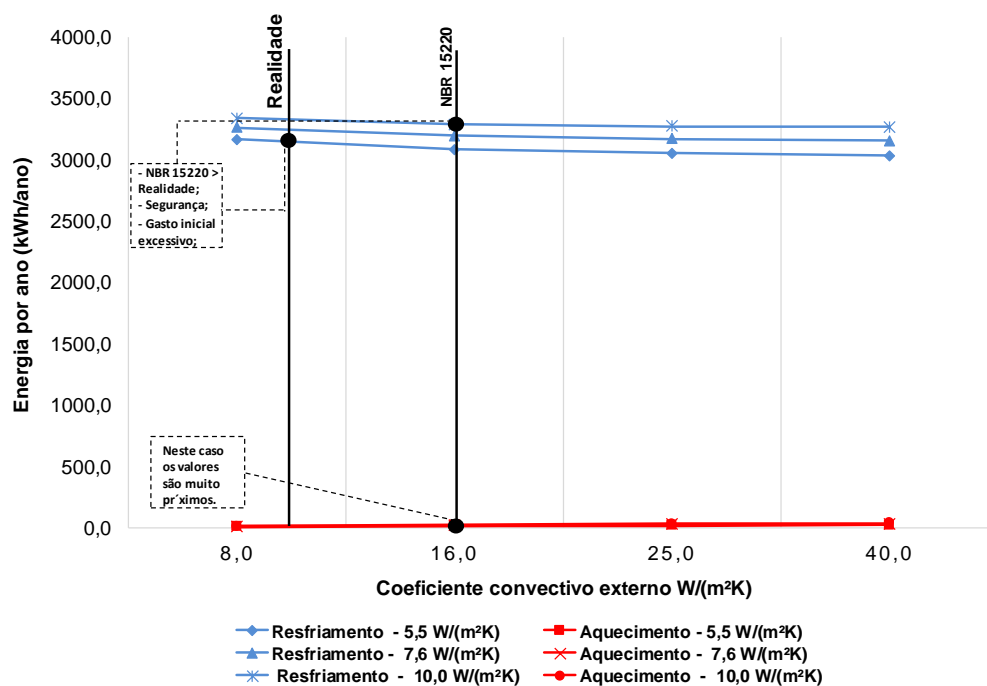
FIGURA 4.19 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA



FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.20 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C

Zona Bioclimática 7: Cuiabá



FONTE: A Autora (2017).

TABELA 4.23 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM CUIABÁ

| ENERGIA POR ANO                 |                          |                              |                         |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|
|                                 | MÍNIMA<br>(SIMULAÇÃO 10) | NBR 15220-2<br>(SIMULAÇÃO 8) | MÁXIMA<br>(SIMULAÇÃO 3) |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO | 1258,0 W                 | 1363,0 W                     | 1366,0 W                |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO  | 505,0 W                  | 556,0 W                      | 453,0 W                 |

FONTE: A Autora (2017).

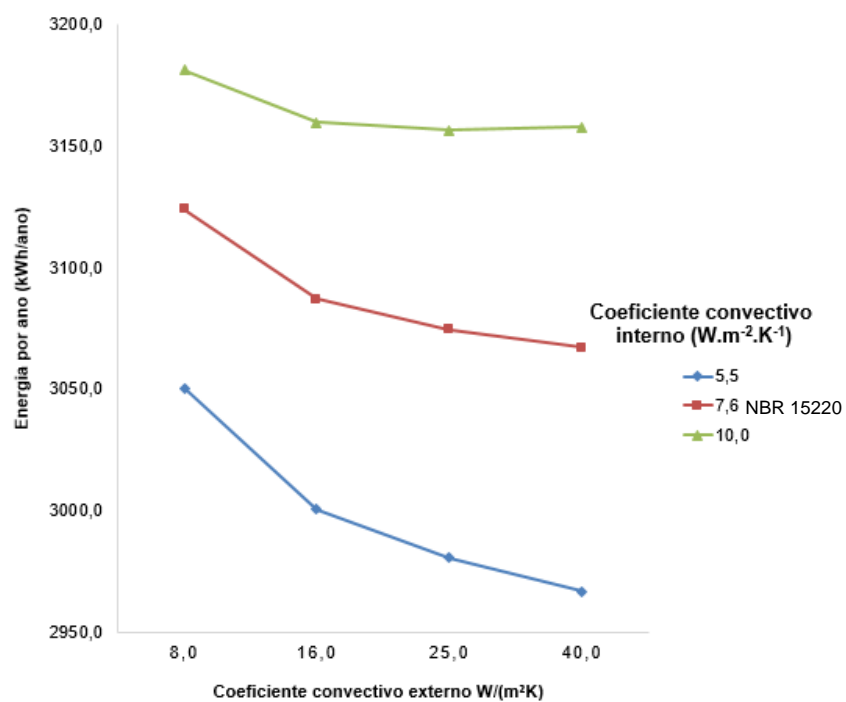
#### 4.4.8 Belém – Z8

TABELA 4.24 - ENERGIA NECESSÁRIA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM BELÉM

| Energia por ano (kWh/ano)          |    |                                    |         |         |
|------------------------------------|----|------------------------------------|---------|---------|
|                                    |    | $h_c$ interno W/(m <sup>2</sup> K) |         |         |
|                                    |    | 5,5                                | 7,6     | 10      |
| $h_c$ externo W/(m <sup>2</sup> K) | 8  | 3050,33                            | 3124,1  | 3181,33 |
|                                    | 16 | 3000,62                            | 3087,18 | 3159,79 |
|                                    | 25 | 2980,61                            | 3074,45 | 3156,59 |
|                                    | 40 | 2966,89                            | 3067,06 | 3157,81 |

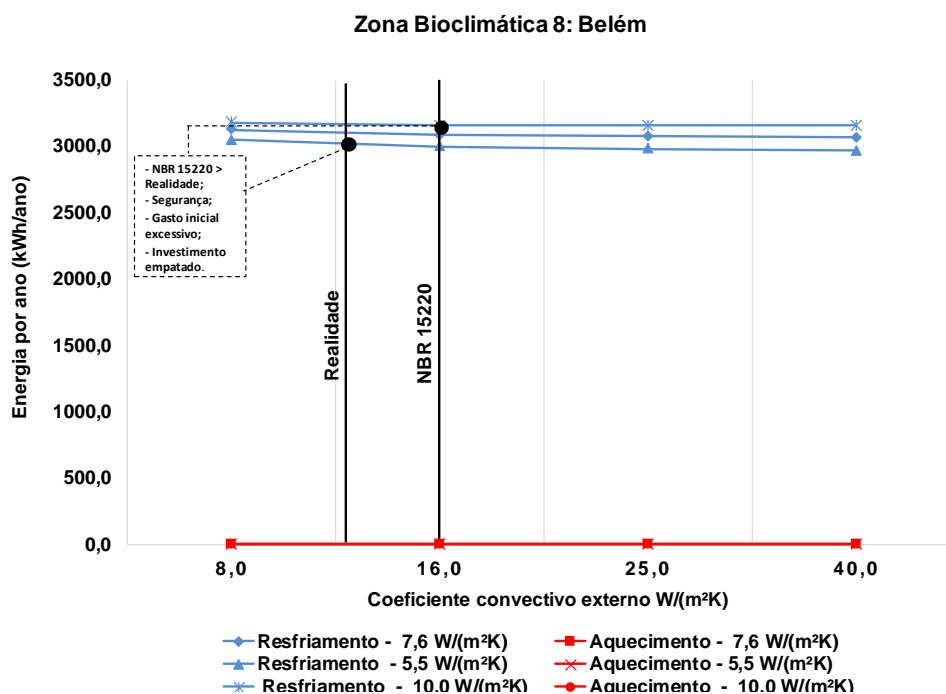
FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.21 - ENERGIA NECESSÁRIA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA



FONTE: A Autora (2017).

FIGURA 4.22 - ENERGIA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NECESSÁRIOS MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C



FONTE: A Autora (2017).

TABELA 4.25 - POTÊNCIA MÁXIMA PARA MANTER A TEMPERATURA ENTRE 20 °C E 26 °C NA EDIFICAÇÃO SIMULADA EM SANTA MARIA

| ENERGIA POR ANO                 |                          |                              |                         |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|
|                                 | MÍNIMA<br>(SIMULAÇÃO 10) | NBR 15220-2<br>(SIMULAÇÃO 8) | MÁXIMA<br>(SIMULAÇÃO 3) |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE RESFRIAMENTO | 940,0 W                  | 973,0 W                      | 1011,0 W                |
| POTÊNCIA MÁXIMA DE AQUECIMENTO  | 0,0 W                    | 0,0 W                        | 0,0 W                   |

FONTE: A Autora (2017).

#### 4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a análise dos resultados será considerada a hipótese de que os coeficientes convectivos sugeridos pela NBR 15220-2 (ABNT 2005) estão acima dos valores reais, pois, conforme verificado, o consumo de energia aumenta consideravelmente com o aumento do coeficiente convectivo interno, e os maiores valores encontrados entre os métodos analisados são os da norma NBR 15220-2 (ABNT 2005). Outro fator que reforça essa hipótese é o fato de que o método usado na NBR é originário da ISO 6946. Nesse método, foi considerado o valor de temperatura externa de 10 °C, típico de países com clima frio. Assim, exagerar os valores de coeficientes de transferência de calor seria uma atitude a favor da segurança, pois se teria a garantia de que o sistema projetado para aquecimento teria potência para isso, pois estaria também superdimensionado. Portanto, os valores de potência máxima encontrados nas simulações com coeficientes sugeridos pela NBR serão comparados com os valores da potência encontrados com os coeficientes de menor valor sugeridos por outros métodos (demanda energética mínima). Vale ressaltar que a potência reflete a capacidade de um sistema de fornecer energia em um intervalo de tempo.

##### 4.5.1 Curitiba - Z1

Verifica-se que os resultados obtidos nas simulações para a cidade de Curitiba apresentam maior consumo energético para o aquecimento, características típicas de regiões frias.



Segundo a Tabela 4.10, a potência máxima de aquecimento para manter o conforto térmico segundo a NBR 15220-2 (ABNT 2005) é 45,2% **maior** do que a potência exigida caso fossem utilizados os menores valores de coeficiente convectivos obtidos através de outros métodos. Para o resfriamento, verificou-se que a potência máxima da norma é 3,4% **maior** do que a potência máxima seguindo os mesmos critérios. Assim, verifica-se que para o dimensionamento de um sistema de conforto térmico, o risco de superdimensionar o sistema de aquecimento é consideravelmente maior. Quanto à previsão de consumo de energia total, há o risco de se exagerá-la em 16,4% em relação à obtida ao se adotar os valores mais prováveis para os coeficientes de convecção interno e externo, de 5,5 e 8,0 W/m<sup>2</sup>K respectivamente.

#### 4.5.2 Santa Maria – Z2

Na cidade de Santa Maria há um consumo maior de energia para resfriamento. A potência máxima para resfriamento usando os coeficientes convectivos da NBR é 16,0% **maior** do que quando são usados os valores menores dos coeficientes de outros métodos. Seguindo o mesmo critério de análise, para aquecimento a potência é 54,0% **maior**. Assim, há maior risco de se superdimensionar o sistema de aquecimento. Quanto à previsão de consumo total de energia, há o risco de se exagerá-la em 10,4% em relação à obtida ao se adotar os valores mais prováveis para os coeficientes de convecção interno e externo, de 5,5 e 8,0 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente.

#### 4.5.3 Belo Horizonte e Brasília – Z3 e Z4

Essas duas cidades possuem comportamentos semelhantes entre si. Nelas, ao contrário das demais zonas bioclimáticas, a potência máxima indica subdimensionamento quando comparada com as simulações com coeficientes menores. Em Belo horizonte, para resfriamento, a norma NBR resulta em uma potência máxima 6,9% **menor** do que aquela obtida com os valores menores de coeficientes. Para o aquecimento é 17,0% **menor**. Seguindo o mesmo critério, Brasília possui para resfriamento uma potência 4,6 % menor e aquecimento com potência 17,7% **menor**.

Quanto à previsão de consumo de energia total, há o risco de se calcular um valor, em Belo Horizonte 13,0% **menor** utilizando os coeficientes da NBR e, em Bra-

sília, 16,4% **menor**, em relação à obtida ao se adotar os valores mais prováveis para os coeficientes de convecção interno e externo de 5,5 e 8,0 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente.

#### 4.5.4 Vitória da Conquista – Z5

Seguindo o mesmo critério utilizado nas demais cidades, em Vitória da Conquista tem-se para resfriamento, segundo a NBR, uma potência máxima 6,3% **menor** e aquecimento 17,5% **menor**. Quanto à previsão de consumo de energia, há o risco de se calcular um valor 10,6% menor em relação à obtida ao se adotar os valores mais prováveis para os coeficientes de convecção interno e externo de 5,5 e 8,0 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente.

#### 4.5.5 Campo Grande e Cuiabá – Z6 e Z7

Nessas cidades o consumo de energia é quase que totalmente utilizado para resfriamento. As simulações para Campo Grande resultaram em uma potência máxima para resfriamento 3,1% **maior** e aquecimento com potência 14,2% **maior**. Em Cuiabá há uma potência de resfriamento 8,3% **maior** e potência de aquecimento 10,0% **maior**. Novamente percebe-se um risco considerável de superdimensionamento no sistema de aquecimento. Quanto à estimativa de consumo de energia total, não se nota grande diferença entre os métodos. Em Campo Grande a NBR está 3,5% acima da menor energia simulada e 4,6 % em Cuiabá em relação à obtida ao se adotar os valores mais prováveis para os coeficientes de convecção interno e externo de 5,5 e 8,0 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente.

#### 4.5.6 Belém –Z8

Em Belém a energia consumida é totalmente dirigida para o resfriamento. A potência máxima para manter o conforto térmico segundo a NBR para o resfriamento foi 3,5% **maior**, ou seja, haveria um pequeno superdimensionamento no sistema de refrigeração. Nesta cidade não há necessidade de aquecimento. Quanto à previsão de consumo total de energia, há o risco de se calcular um valor 3,6% maior em

relação à obtida ao se adotar os valores mais prováveis para os coeficientes de convecção interno e externo de 5,5 e 8,0 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente.

#### 4.5.7 Resumo

Na tabela 4.26A é apresentado um resumo dos resultados descritos. Esses resultados são baseados considerando que os valores constantes na NBR 15220 estão acima dos valores reais, contudo, na tabela 4.26B são apresentadas as comparações com os casos nos quais os coeficientes da NBR são considerados menores que os simulados, ou seja, são comparados com as máximas demandas de energia obtidas, quando o coeficiente convectivo interno e externo é 10 e 40 W/m<sup>2</sup>K respectivamente.

TABELA 4.26A - COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA MÁXIMA ENTRE A DEMANDA DE ENERGIA DA NBR 15220 E A DEMANDA MÍNIMA DE ENERGIA

| CIDADE                                     | SENTIDO DO CALOR | NBR 15220 -1 MÍNIMO | CONSEQUÊNCIA         |
|--|------------------|---------------------|----------------------|
| Zona bioclimática 1 - Curitiba             | Resfriamento     | 3,4%                | Superdimensionamento |
|  | Aquecimento      | 45,2%               | Superdimensionamento |
| Zona bioclimática 2 - Santa Maria          | Resfriamento     | 16,0%               | Superdimensionamento |
|  | Aquecimento      | 54,0%               | Superdimensionamento |
| Zona bioclimática 3 - Belo Horizonte       | Resfriamento     | -6,9%               | Subdimensionamento   |
|  | Aquecimento      | -17,0%              | Subdimensionamento   |
| Zona bioclimática 4 - Brasília             | Resfriamento     | -4,6%               | Subdimensionamento   |
|  | Aquecimento      | -17,7%              | Subdimensionamento   |
| Zona bioclimática 5 - Vitória da Conquista | Resfriamento     | -6,3%               | Subdimensionamento   |
|  | Aquecimento      | -17,5%              | Subdimensionamento   |
| Zona bioclimática 6 - Campo Grande         | Resfriamento     | 3,1%                | Superdimensionamento |
|  | Aquecimento      | 14,2%               | Superdimensionamento |
| Zona bioclimática 7 - Cuiabá               | Resfriamento     | 8,3%                | Superdimensionamento |
|  | Aquecimento      | 10,0%               | Superdimensionamento |
| Zona bioclimática 8 - Belém                | Resfriamento     | 3,5%                | Superdimensionamento |
|  | Aquecimento      | -                   | -                    |

FONTE: A Autora (2017).

Percebe-se que há uma tendência de superdimensionamento para o sistema de condicionamento térmico, sendo que é mais elevado para o aquecimento, com exceção das zonas bioclimáticas 3, 4 e 5.

TABELA 4.27B - COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA ENTRE A DEMANDA DE ENERGIA DA NBR 15220 E A DEMANDA MÁXIMA

| CIDADE                                     | SENTIDO DO CALOR | NBR 15220 -1 MÁXIMO | CONSEQUÊNCIA             |
|--|------------------|---------------------|--------------------------|
| Zona bioclimática 1 - Curitiba             | Resfriamento     | -3,6%               | Subdimensionamento       |
|  | Aquecimento      | -10,2%              | Subdimensionamento       |
| Zona bioclimática 2 - Santa Maria          | Resfriamento     | -1,3%               | Subdimensionamento       |
|  | Aquecimento      | -5,7%               | Subdimensionamento       |
| Zona bioclimática 3 - Belo Horizonte       | Resfriamento     | 8,6%                | Superdimensionamento     |
|  | Aquecimento      | 56,9%               | Superdimensionamento     |
| Zona bioclimática 4 - Brasília             | Resfriamento     | 3,7%                | Superdimensionamento     |
|  | Aquecimento      | 63,5%               | Superdimensionamento     |
| Zona bioclimática 5 - Vitória da Conquista | Resfriamento     | 9,5%                | Superdimensionamento     |
|  | Aquecimento      | 57,3%               | Superdimensionamento     |
| Zona bioclimática 6 - Campo Grande         | Resfriamento     | -1,0%               | Subdimensionamento       |
|  | Aquecimento      | 19,1%               | Superdimensionamento     |
| Zona bioclimática 7 - Cuiabá               | Resfriamento     | 0,2%                | Diferença insignificante |
|  | Aquecimento      | 22,7%               | Superdimensionamento     |
| Zona bioclimática 8 - Belém                | Resfriamento     | -3,7%               | Subdimensionamento       |
|  | Aquecimento      | -                   | -                        |

FONTE: A Autora (2017).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do presente trabalho foi levantar as diferentes formas de cálculo dos coeficientes convectivos utilizados nos projetos térmicos de edificações e verificar o impacto no dimensionamento dos equipamentos de condicionamento de ar e na previsão do consumo energético ao se utilizar diferentes métodos de cálculo dos coeficientes convectivos.

Durante o desenvolvimento foi verificado que esses coeficientes são o resultado de fenômenos convectivos que ocorrem na superfície e dependem fortemente do comportamento do escoamento e que, devido à complexidade do fenômeno, métodos empíricos podem fornecer resultados mais práticos do que os métodos analíticos.

Foi constatado durante a revisão bibliográfica que os dados climáticos utilizados no método da ISO 6946, aplicada na NBR 15220-2 (ABNT 2005), representam locais com clima tipicamente frio, pois consideram como temperatura externa 10 °C.

Para os demais métodos levantados, verificou-se que o coeficiente convectivo externo é dado em função da velocidade do vento, enquanto que o coeficiente convectivo interno é dado em função da diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente. Como o objetivo foi a comparação, os mesmos valores de velocidade de vento e diferença de temperatura utilizados na NBR foram inseridos nas equações, sendo 4,0 m/s e para o vento e 10 °C para a diferença de temperatura. Constatou-se que ao inserir esses valores nas equações de cada método, os resultados de coeficientes convectivos se mostraram bastante diferentes. Assim, baseado nesses resultados, diferentes valores de coeficientes convectivos foram utilizados para as simulações de demanda de energia. Vale ressaltar que isso foi realizado para efeitos de comparação, foco do trabalho, contudo, para realizar outra abordagem, poder-se-ia analisar as características de vento e temperatura de cada cidade, para inserir dados mais precisos nas equações. Para ter-se uma ideia, foi levantada a velocidade de vento média das cidades: Curitiba 2,6 m/s; Santa Maria 1,5 m/s; Belo Horizonte 2,0 m/s; Brasília 2,7 m/s; Vitória da Conquista 2,4 m/s; Campo Grande 4,7 m/s; Cuiabá 2,5 m/s e Belém 0,9 m/s. Nas estações meteorológicas, tal medição é

comumente feita a 10,0 m do chão e em terreno afastado dos centros urbanos, portanto, com uma tendência a se exagerar em relação à realidade das edificações. O valor de 4,0 m/s para velocidade média do ar nos centros urbanos deve ser considerado, em princípio, exagerado.

Existem outras observações. Por exemplo, um apartamento no térreo de um edifício em um local com alta densidade urbana poderia estar sujeito a condições bem diferentes de apartamentos que se encontram no último andar, principalmente com relação à radiação incidente e vento. Poder-se-ia levar em consideração outras características também, tal como a umidade e aspectos geográficos. Com relação à radiação, em locais com alta incidência, ela poderia afetar as temperaturas externas e também internas das superfícies (considerando em geral um baixo valor de resistência térmica interna das paredes); assim, a temperatura da superfície interna iria afastar-se daquela do ar nos interiores de edifício mecanicamente condicionados, aumentando o comportamento das trocas de calor.

Verificou-se que o aumento dos coeficientes convectivos internos aumenta mais o consumo de energia previsto quando comparado com o aumento dos coeficientes convectivos externos. Associado a isso, entre os métodos analisados, constatou-se que os maiores valores encontrados para os coeficientes internos se referem ao método utilizado na NBR 15220-2 (ABNT 2005). Assim, este resulta nos maiores valores de consumo energético previsto e potência dos sistemas de condicionamento de ar.

Ainda, analisando as equações, verificou-se que este valor maior pode estar ocorrendo devido à soma da parcela da radiação ao coeficiente, ressaltando que essa parcela é calculada analiticamente na NBR15220. Nos demais métodos, que resultaram em valores menores, as equações não contém uma variável que considere a radiação; contudo, as equações foram obtidas através de experimentos, o que significa que a radiação está de alguma forma considerada, pois, durante os experimentos, ela estava presente nos resultados que, posteriormente, foram usados para estabelecer as equações. Ocorre que no caso do coeficiente convectivo interno, as equações estão em função da diferença de temperatura entre a superfície e o meio, e a radiação depende da temperatura, logo, a radiação pode estar de alguma forma representada nos resultados finais fornecidos pelos experimentos. Portanto, há evi-

dências de que os valores de coeficientes convectivos propostos pela NBR podem estar acima do real. Adotando isso como premissa, considerou-se que os valores mais próximos dos reais são os menores valores, assim, foram comparados os resultados de potência e demanda da NBR com os resultados menores. A comparação demonstrou que a NBR pode estar superdimensionando os sistemas de condicionamento térmico em até 57,3% quando foi analisada a potência máxima obtida nas simulações, contudo, em alguns casos, seguindo os mesmos critérios, houve subdimensionamento. Esses dois tipos de resultados reforçam a necessidade de se analisar as diferentes zonas bioclimáticas no desenvolvimento de projetos térmicos.

Ressalta-se que os valores simulados se referem a uma edificação relativamente simples, pois os resultados tiveram o objetivo de servir para comparação entre os métodos, conforme proposta do trabalho, e não para cálculo real de impacto econômico.



## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Durante o desenvolvimento do trabalho percebeu-se que a resposta para algumas questões que estão fora do escopo do trabalho poderia trazer avanço para o aumento da eficiência de projetos térmicos de edificações.

Por exemplo, poder-se-ia investigar, entre os métodos levantados para o cálculo dos coeficientes convectivos, qual seria melhor aplicado para o caso do Brasil. Para isso, seria possível realizar a validação de cada uma delas através de medições em campo. É possível também que, para algumas regiões do Brasil, um método forneça melhores resultados do que outra, assim, seria possível também especificar um método para cada zona bioclimática.

Também foi verificado que as oito zonas bioclimáticas foram classificadas segundo dados de temperatura e umidade, contudo, foi constatado que o coeficiente convectivo externo é dependente da velocidade do vento, com isso, em outra abordagem, seria possível um estudo detalhado desse coeficiente, com base apenas em análise de dados de vento, assim não precisaria considerar as zonas bioclimáticas.

Outro trabalho poderia abordar os materiais utilizados nas edificações. Como visto, os coeficientes convectivos dependem da natureza da superfície, tal como rugosidade e absortividade, assim, um estudo poderia indicar quais tipos de superfícies são melhores para a eficiência energética em edificações, sob o ponto de vista das resistências térmicas superficiais.

Por fim um trabalho futuro poderia realizar cálculos de demanda em edificações mais realistas considerando as zonas bioclimáticas levantadas durante o trabalho, para que fosse calculado o impacto financeiro na variação dos métodos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. (1997). NBR 15220:2005. *Desempenho térmico de edificações*. Rio de Janeiro. Brasil.

ABNT. (1997). NBR 15575:2013. *Edificações habitacionais – Desempenho*. Brasil.

ALVES, A. B. M. **Potencial de climatização por dutos subterrâneos segundo zona bioclimática, profundidade e tratamento da superfície do solo**. Dissertação. Programa de pós-graduação em engenharia da construção civil. PPGECC - Área de concentração em ambiente construído e gestão. Universidade federal do paraná. Curitiba. 2014.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília. 3  ed  o. 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Ministerial 3523, de 28.8.98. Dispõe sobre Ar Condicionado. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 31 Ago. 1998. Disponível em: [http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523\\_28\\_08\\_1998.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523_28_08_1998.html). Acesso em 4 março 2016.

BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E; LIGHTFOOT, Edwin N. **Fen menos de transporte**. 2  ed  o. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

BLOCKEN, B.; DEFRAEYE, T.; DEROME, D.; CARMELIET, J. High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building. **Energy and Buildings**. Elsevier 2009. p. 2396-2412.

BONI, A. L. **Modelagem matemática da transferência de calor não estacionária "ar+solo"**. Ijuí, 2003. Disserta o (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2003.

DIAKAKI, C.; GRIGOROUDIS, E.; KOLOKOSTSA, D. Towards. Optimization approach for improving energy efficiency in buildings. **Energy and Buildings**, v. 40. Issue, 2008.

DIAS, R. A; MATTOS. C. B. BALESTIERI, J. A. P. **A Ciência para o Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo. 2001.

DOMBROSKY, R. F. **Eficientização de um sistema de Climatização Aeroportuário a Partir do Uso da Termoacumulação**. Dissertação – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Unisinos. São Leopoldo, RS. 2012.

EMMEL, M. G.; ABADIE, M. O.; MENDES, N. New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings. **Energy and Buildings**, Elsevier 2007. p. 335-342.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Resenha mensal do mercado de Energia Elétrica**. Ano IX. Número 104. Rio de Janeiro, 2016.

FOHANNO, S.; POLISORI, G. Modelling of natural convective heat transfer at an internal surface. **Energy and Buildings**, Elsevier 2006. p.548-553.

FROTA, A. B; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo**. 5ª edição. São Paulo. Studio Nobel, 2001

GOULART, S. V. G. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis**. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

HARKOUSS, F. **Sensitivity study of building thermal simulations to some input parameters**. Final year project. Engineering degree from the lebanese university. Faculty of Engineering- Branch III. 2013.

HOLMAN, J. P. **Heat Transfer**, 5th ed, McGraw-Hill Book, 1981.

ISO INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6946 – Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method**. British, 1997.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P.; BERGAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª edição. Rio de Janeiro. 2008.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW, 1997. 192 p.

MACAHDO, C. B. Z. **O tratamento de aspectos de conforto térmico em residências do período modernista em Curitiba**. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Construção Civil. Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. 2008.

MARTINS, R. **Desenvolvimento de isolador polimérico inteligente**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. 2015.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. E. R. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios. Segunda Edição. Porto Alegre. 1992.**

MAZZAROTTO, A. C. E. K. Uso do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios em Curitiba. Curitiba, 2011. Dissertação. Programa de pós graduação em construção civil. Setor de tecnologia. Universidade Federal do Paraná. 2011.

MEIER, A. OLOFSSON, T. LAMBERTS, R. What is na Energy-Efficiency Building? In: **IX Entac** – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Foz do Iguaçu, 2002.

MELO, A. P. **Avaliação computacional de estratégia para a redução do consumo de energia elétrica em um hotel de Florianópolis**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Energia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

MIRSADEGHI, M.; CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M. Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty. **Energy and Buildings**, Elsevier 2013. p. 134-151.

MME - Ministério das Minas e Energia. **Estudos de demanda. 2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da Demanda de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2016.

OBYN, S.; MOESEKE, V. G. Variability and impact of internal surfaces convective heat transfer coefficients in the thermal evaluation of office buildings. **Applied Thermal Engineering**. Elsevier. 2015. p. 258 e 272.

OLGYAY, V. **Design with Climate**. Princeton University Press. New Jersey. 1973.

OHLSSON, K. E. A.; ÖSTIN, R.; OLOFSSON, T. Accurate and robust measurement of the external convective heat transfer coefficient based on error analysis. **Energy and Buildings**. Elsevier 2016. p. 83-90.

ORDENES, M; LAMBERTS, R; GÜTHS, S. **Transferência de calor na envolvente da edificação**. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Florianópolis, 2008.

PALYVOS J.A., A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling, Applied Thermal Engineering. **Science Direct**. Elsevier. 2008. p. 801-808.

PEETERS, L.; BEAUSOLEIL-MORRISONB, I.; NOVOSELAC, A. Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations. **Energy and Buildings**. Elsevier. 2011. p. 2227–2239.

PERTSCHI, S. C. **Aspectos do campo térmico da área urbana de São José dos Pinhais. PR. Situação de Verão**. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Construção Civil. Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. 2005.

PROCEL EDIFICA. **Programa de eficiência energética nas Edificações**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm>. Acessado em 20/12/2016.

PESQUISA NACIONAL POR AMOSTRA DE DOMICÍLIOS - PNAD. **Déficit habitacional total por situação do domicílio**. Brasil, Grandes Regiões, UF e Regiões Metropolitanas IBGE EM 2013. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/menu/deficit-habitacional/deficit-habitacional-no-brasil>. Acessado em 31/03/2017.

ROBSON, C. **Real world research: a resource for social scientists and practitioner-researchers**. 2.ed. Oxford, Blackwell: 2002.

RODRIGUEZ, U. A. L. **Simulação numérica de transferencia de energia e umidade atraves do solo em um sistema trocador-armazenador de calor**. Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.

SERAFIN, R. M. N. **Avaliação da redução do consumo de energia elétrica em função do Retrofit no edifício Sede da Eletrosul**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC. 2010.

SIQUEIRA, T. C. P. A.; AKUTSO, M.; LOPES, J. I. B.; SOUZA, H. A. **Dados climáticos para avaliação dedesempenho térmico de edificações**. Minas, Ouro Peto. p. 133-138, 2005.

SCHMID, A. L. Simulação de desempenho térmico em múltiplas zonas: Mestre, um sistema brasileiro na linguagem java. **ENCAC**. São Pedro, SP.2001.

SHAO, J. LIU J.; ZHAO J.; ZHANG W.; SUN D.; FU Z. A novel method for full-scale measurement of the external convective heat transfer coefficient for building horizontal roof. **Energy and Buildings**. Elsevier.2009. p. 840–847

SOLA, A. V. H; KOVALESKI, J. L. Eficiência energética nas Indústrias: Cnários & Oportunidades. **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Florianópolis, SC. 2004

VAZ, J. **Estudo experimental numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia no aquecimento e resfriamento de ambientes edificadas no sul do Brasil**. Porto Alegre, 2011. Tese de dourado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VILELA, M. M. **Estudo de método experimental para determinar a potencialidade do uso de energia geotérmica a baixa profundidade**. São Paulo, 2004. Tese (Doutorado em Energia) Universidade de São Paulo.

YIN, R. **Estudo de caso - planejamento e métodos**. 2ª ed. Porto Alegre, Bookman: 2001.